



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL**  
**CAMPUS DE CERRO LARGO**  
**CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA**

**LAURA BEHLING**

**ELETROFLOCULAÇÃO APLICADA NO TRATAMENTO DE EFLUENTE  
LÁCTEO: DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E OTIMIZAÇÃO DE MÚLTIPLAS  
RESPOSTAS**

**CERRO LARGO**

**2018**

**LAURA BEHLING**

**ELETROFLOCULAÇÃO APLICADA NO TRATAMENTO DE EFLUENTE  
LÁCTEO: DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E OTIMIZAÇÃO DE MÚLTIPLAS  
RESPOSTAS**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira Sul campus Cerro Largo/RS.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Ma. Aline Raquel Müller Tones

Co-orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. Alcione Aparecida de Almeida Alves

**CERRO LARGO**

**2018**

PROGRAD/DBIB - Divisão de Bibliotecas

Behling, Laura

Eletrofloculação aplicada no tratamento de efluente lácteo: Delineamento experimental e otimização de múltiplas respostas/ Laura Behling. -- 2018.  
64 f.:il.

Orientador: Aline Raquel Müller Tones.

Co-orientador: Alcione Aparecida de Almeida Alves.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) -  
Universidade Federal da Fronteira Sul, Curso de Engenharia Ambiental e sanitária , Cerro Largo, RS, 2018.

1. Efluente lácteo. 2. Eletrofloculação. 3. Eletrodo de alumínio. 4. DCCR. I. Tones, Aline Raquel Müller, orient. II. Alves, Alcione Aparecida de Almeida, co-orient. III. Universidade Federal da Fronteira Sul. IV. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL

UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL  
CAMPUS CERRO LARGO

COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA - BACHARELADO

Ministério da Educação

Universidade Federal da Fronteira  
Sul

Campus Cerro Largo  
Rua Major Antônio Cardoso, 590  
Cerro Largo-RS CEP 97900-000

(51) 3359-3950  
www.ufff.edu.br

**Acadêmico:** Laura Behling

**Título do Trabalho:** Eletro-floculação aplicada no tratamento de efluente lácteo: delineamento experimental e otimização de múltiplas respostas.

**Banca Examinadora:**

**Profª. Ma. Aline Raquel Müller Tones - Orientadora**

**Profª. Dra. Alcione Aparecida de Almeida Alves - Co-orientadora**

**Profª. Dra. Juliana Schöntag**

Cerro Largo, 12 de Março de 2018.

Dedico a minha mãe, Ivani Teresinha Cerolli  
Behling, pelo apoio e amor incondicional.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a Deus, a cada momento que esteve guiando meus passos.

Agradeço a minha mãe, Ivani Teresinha Cerolli Behling, pelo amor, compreensão, apoio e incentivo a seguir meus sonhos. Minha vitória é tua vitória.

Ao meu irmão, sempre presente na minha vida, pela preocupação e pelos momentos divertidos que me proporciona.

Ao meu namorado Fernando Gering Veiga, pelo amor, torcida, paciência, apoio e compreensão nessa etapa.

A professora Ma. Aline Raquel Müller Tones pela orientação, disponibilidade, dedicação, confiança, ajuda, paciência, compreensão e amizade apresentada.

A professora Dr<sup>a</sup>. Alcione Aparecida de Almeida Alves pela colaboração com a pesquisa, atenção e auxílio.

Agradeço a todos os docentes do curso de engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira Sul.

Agradeço a todas minhas amigas que participaram dessa etapa, colaborando de alguma forma na realização deste trabalho, principalmente a colega de pesquisa Débora Barbosa, por todo apoio nas horas passadas no laboratório, e as colegas Aline Schonarth, Diana Bär e Natali Bagatini.

A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram na minha graduação, agradeço de coração!

## RESUMO

Uma das principais preocupações da sociedade é a preservação dos recursos hídricos. As indústrias que utilizam elevado volume de água no processamento, como a indústria láctea, geram grande quantidade de efluente. Faz-se necessário o desenvolvimento de técnicas de tratamento que associem baixo custo com alta eficiência. O processo de eletrofloculação (EF) surge como uma alternativa aos processos de tratamento de efluentes. O objetivo dessa pesquisa consiste em aplicar a tecnologia de EF, utilizando Al como eletrodo de sacrifício, no tratamento do efluente de indústria de produtos lácteos, avaliando a eficiência na remoção de cor, turbidez, demanda química de oxigênio (DQO) e absorvância  $\lambda$  - 254 nm, além de definir as condições ideais de tratamento. Foi utilizado como delineamento experimental, o DCCR 2<sup>3</sup>, composto por 17 ensaios. A análise de variância (ANOVA), os gráficos de superfície de resposta, contorno e a desejabilidade global serviram como base para determinação das condições otimizadas de tratamento. Estes resultados demonstraram com 95 % de confiabilidade a significância das variáveis independentes para obtenção da remoção das variáveis respostas. As condições otimizadas determinadas através de análise estatística são pH inicial de 4,5, corrente 3,34 A e tempo de tratamento 55,2 min. As remoções obtidas nessas condições foram 72,95 % de DQO, 95,8 % de turbidez, 97,9 % de cor aparente e 71,5 % de absorvância  $\lambda$ - 254 nm. A técnica de tratamento EF mostrou-se eficiente para a remoção das variáveis respostas, embora outros parâmetros analisados não tenham apresentado elevada eficiência.

**Palavras-chave:** Efluente lácteo. Eletrofloculação. Eletrodo de alumínio. DCCR.

## ABSTRACT

One of the main concerns of society is the preservation of water resources. Industries that use high volumes of water in processing, such as the dairy industry, generate a large amount of effluent. It is necessary to develop treatment techniques that associate low cost with high efficiency. The process of electroflocculation (EF) appears as an alternative to the processes of treatment of effluents. The objective of this research is to apply EF technology, using Al as a sacrifice electrode, in the treatment of the effluent of the dairy industry, evaluating the efficiency in the removal of color, turbidity, chemical oxygen demand (COD) and absorbance  $\lambda$  - 254 nm, besides defining the optimal treatment conditions. The DCCR 2<sup>3</sup>, composed of 17 trials, was used as the experimental design. Analysis of variance (ANOVA), surface contour, contour and overall desirability graphs served as a basis for determination of optimized treatment conditions. These results demonstrated with 95% confidence the significance of the independent variables to obtain the removal of the response variables. The optimized conditions determined by statistical analysis are initial pH of 4.5, current 3.34 A and treatment time 55.2 min. The removals obtained under these conditions were 72,95 % COD, 95,8 % turbidity, 97,9 % apparent color and 71,5% absorbance  $\lambda$ -254 nm. The EF treatment technique proved to be efficient for the removal of the response variables, although other parameters analyzed did not present high efficiency.

**Key words:** Dairy effluent. Electroflocculation. Aluminum electrode. DCCR.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Interações que ocorrem no processo de EF com eletrodo de Al.....	21
Figura 2 – Efluente bruto de indústria de lácteos .....	37
Figura 3 - Reator eletroquímico (batelada).....	38
Figura 4 - Efluente bruto e efluente tratado por EF.....	46
Figura 5 - Gráfico de Pareto para as variáveis dependentes (a) Turbidez, (b) Cor aparente, (c) DQO e (d) Absorvância $\lambda$ - 254 nm .....	47
Figura 6 - Remoção da variável Turbidez .....	49
Figura 7 - Remoção da variável Cor aparente .....	49
Figura 8 - Remoção da variável DQO .....	50
Figura 9 - Remoção da variável Absorvância $\lambda$ - 254 nm .....	50
Figura 10 - Otimização simultâneas das variáveis dependentes por meio da função de Desejabilidade Global.....	52
Figura 11 - Remoção nas condições de desejabilidade global .....	53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção de leite no Brasil nos anos de 1986 a 2016 .....	17
Tabela 2 - Países com maior produção de leite em 2000 e 2015.....	18
Tabela 3 - Valores dos padrões para lançamento de efluentes em corpos hídricos Classe II ..	36
Tabela 4 - Padrões de emissão estabelecidos pela Resolução N° 128/2006 no estado do Rio Grande do Sul .....	36
Tabela 5 - Níveis estudados para as variáveis independentes da matriz de delineamento experimental .....	39
Tabela 6 - Parâmetros físico-químicos analisados .....	41
Tabela 7 - Caracterização físico-química do efluente bruto.....	42
Tabela 8 - ANOVA do modelo previsto para a redução de DQO, turbidez, cor e absorvância $\lambda$ - 254 nm de efluente lácteo tratado por EF com eletrodo de Al ao nível de significância de 95% ( $p < 0,05$ ).....	48
Tabela 9 - Validação do modelo de desejabilidade global .....	54
Tabela 10 - Caracterização do efluente após EF .....	55

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Matriz do Delineamento Experimental .....	40
Quadro 2 - Resultado da remoção média (%) dos parâmetros analisados após a EF.....	45

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Reações de oxidação no ânodo.....	22
Equação 2 – Reações de redução no cátodo.....	22
Equação 3 – Reação geral da eletrólise.....	22
Equação 4 – Índice de biodegradabilidade.....	30
Equação 5 – Modelo geral de otimização.....	39

.

## LISTA DE ABREVIATURAS

Al – Alumínio

APHA - American Public Health Association

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CONSEMA – Conselho Estadual do Meio Ambiente

DBO – Demanda bioquímica de oxigênio

DCCR - Delineamento Composto Central Rotacional

DQO – Demanda química de oxigênio

EC - Eletrocoagulação

EF – Eletrofloculação

Fe - Ferro

OD – Oxigênio dissolvido

PIB - Produto Interno Bruto

PH – Potencial hidrogeniônico

RPM - Rotação Por Minuto

SD – Sólidos dissolvidos

SDF – Sólidos dissolvidos fixos

SDV – Sólidos dissolvidos voláteis

SS – Sólidos suspensos

SSed – Sólidos sedimentáveis

SSF – Sólidos suspensos fixos

SSV – Sólidos suspensos voláteis

ST – Sólidos totais

STF – Sólidos totais fixos

STV – Sólidos totais voláteis

u.C. - unidade de Cor

UFFS - Universidade Federal da Fronteira Sul

UHT – *Ultra High Temperature*

UNT - Unidades nefelométricas de turbidez

u.a. - unidade de absorvância

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>16</b>
2.1	OBJETIVO GERAL.....	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>17</b>
3.1	INDÚSTRIA DE PRODUTOS LÁCTEOS .....	17
<b>3.1.1</b>	<b>Efluente da indústria de produtos lácteos .....</b>	<b>19</b>
3.2	ELETROFLOCULAÇÃO .....	20
<b>3.2.1</b>	<b>Parâmetros que influenciam no processo de EF .....</b>	<b>22</b>
3.2.1.1	Densidade de corrente .....	22
3.2.1.2	Tempo de tratamento .....	23
3.2.1.3	Distância entre os eletrodos .....	23
3.2.1.4	pH .....	24
3.2.1.5	Passivação dos eletrodos .....	24
3.2.1.6	Temperatura.....	24
3.2.1.7	Material dos eletrodos .....	25
<b>3.2.2</b>	<b>Vantagens e desvantagens da EF .....</b>	<b>25</b>
<b>3.2.3</b>	<b>EF aplicada no tratamento de diferentes efluentes industriais .....</b>	<b>26</b>
3.3	PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS .....	28
<b>3.3.1</b>	<b>Demanda Química de Oxigênio .....</b>	<b>28</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Demanda Bioquímica de Oxigênio.....</b>	<b>29</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Índice de biodegradabilidade .....</b>	<b>29</b>
<b>3.3.4</b>	<b>Óleos e graxas .....</b>	<b>30</b>
<b>3.3.5</b>	<b>Condutividade elétrica .....</b>	<b>31</b>
<b>3.3.6</b>	<b>Turbidez .....</b>	<b>31</b>
<b>3.3.7</b>	<b>Cor Aparente .....</b>	<b>32</b>
<b>3.3.8</b>	<b>Absorvância.....</b>	<b>32</b>
<b>3.3.9</b>	<b>pH.....</b>	<b>33</b>
<b>3.3.10</b>	<b>Temperatura .....</b>	<b>33</b>
<b>3.3.11</b>	<b>Oxigênio Dissolvido .....</b>	<b>33</b>
<b>3.3.12</b>	<b>Série de sólidos .....</b>	<b>34</b>
3.4	LEGISLAÇÃO AMBIENTAL .....	35

<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>37</b>
4.1	EFLUENTE .....	37
4.2	MÓDULO EXPERIMENTAL .....	38
4.3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	38
4.4	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....	39
4.5	CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE.....	40
4.6	ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	41
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>42</b>
5.1	CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE.....	42
5.2	APLICAÇÃO DA EF PARA O TRATAMENTO DO EFLUENTE DE INDÚSTRIA DE LÁCTEOS.....	45
5.2.1	Eficiência na remoção de DQO, turbidez, cor aparente e absorvância $\lambda$ -254 nm.	45
5.2.2	Otimização do processo de EF .....	47
5.2.3	Desejabilidade Global .....	51
5.2.4	Validação do modelo proposto .....	53
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>57</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>58</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Uma das principais preocupações da sociedade atualmente é a preservação dos recursos hídricos tendo em vista a importância da água para a vida de todas as espécies do planeta. A contaminação dos corpos hídricos resultou no enrijecimento e aprimoramento da legislação ambiental no que tange a diretrizes e critérios para o lançamento de efluentes em águas superficiais, fato que tem preocupado, em especial, as indústrias que utilizam elevado volume de água no processamento da matéria-prima, a exemplo da indústria de alimentos.

A indústria láctea destaca-se no setor alimentício por ser um alimento do cotidiano e um dos maiores consumidores de água, sendo utilizada no processamento de leite e seus derivados e também para limpeza e desinfecção das instalações de produção. Essa utilização é preocupante, pois gera uma grande quantidade de efluente, frequentemente caracterizados por elevada matéria orgânica (SARAIVA et al., 2009).

Por produzirem diferentes produtos, como leite, leite em pó, creme de leite, sorvete, queijo, as características dos efluentes gerados são variáveis, dependendo do sistema produtivo utilizado na indústria. Parte desse efluente não pode ser reutilizado, podendo gerar danos ambientais se lançado no meio ambiente sem tratamento (ROGGENBACK, 2016).

O efluente lácteo é considerado complexo por ter uma composição muito ampla e variável, além de possuir um alto teor de matéria orgânica devido à presença de soro de leite, óleos, sais dissolvidos, nutrientes e sólidos. Devido a essa complexidade e volume do efluente, é necessário o desenvolvimento de técnicas de tratamento que associem baixo custo com alta eficiência (MELCHORS et al., 2016).

Nesse contexto, o processo de eletrofloculação (EF) surgiu como uma alternativa aos processos de tratamento de efluentes. Este tratamento eletroquímico desestabiliza as moléculas do poluente do efluente através de uma diferença de potencial elétrico aplicado aos eletrodos de sacrifício, geralmente de ferro (Fe) ou alumínio (Al) e, como consequência, cátions são gerados pelo ânodo, reagindo com os colóides da solução tratada, flotando em forma de hidróxidos (STRATE, 2014).

Este estudo consiste no delineamento experimental e otimização do tratamento de efluente lácteo tratado por meio da EF utilizando o eletrodo de Al como eletrodo de sacrifício.



## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do trabalho consiste em aplicar delineamento experimental estatístico na otimização de múltiplas respostas resultantes do tratamento de efluente de uma indústria de produtos lácteos por EF, utilizando eletrodo de sacrifício de Al.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

a) Caracterizar o efluente proveniente da indústria de produtos lácteos por meio da análise dos parâmetros físico-químicos: cor, turbidez, demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), absorvância  $\lambda$ - 254 nm, sólidos totais, sólidos totais fixos, sólidos totais voláteis, sólidos sedimentáveis, sólidos suspensos, sólidos suspensos fixos, sólidos suspensos voláteis, sólidos dissolvidos, sólidos dissolvidos fixos, sólidos dissolvidos voláteis, óleos e graxas, oxigênio dissolvido (OD), potencial hidrogeniônico (pH) e condutividade.

b) Avaliar a eficiência da EF na remoção da cor, turbidez, DQO e absorvância  $\lambda$  – 254 nm com uso do eletrodo de Al;

c) Definir as condições ideais de tratamento para remoção da cor, turbidez, absorvância  $\lambda$ - 254 nm e DQO com base no Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR);

d) Analisar a eficiência da EF, a partir das condições de tempo, corrente e pH otimizados;

e) Realizar uma análise comparativa do efluente de indústria de produtos lácteos tratado por EF, em relação aos padrões para lançamento de efluentes em corpos hídricos estipulados pelas Resoluções 357/2005 e 430/2011 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) e Resolução 128/2006 do Conselho Estadual do Meio Ambiente (CONSEMA).

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 INDÚSTRIA DE PRODUTOS LÁCTEOS

O agronegócio do leite ocupa um espaço em destaque na economia mundial. Este sistema agroindustrial é um dos mais expressivos do Brasil, principalmente pela sua importância social, uma vez que a atividade leiteira é praticada em todo país. A produção de leite de vaca no Brasil cresceu a uma taxa relativamente constante desde 1974 até os dias atuais. Segundo dados da Pesquisa Pecuária Municipal realizada pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), o país saiu do patamar de 7,1 bilhões de litros de leite produzidos naquele ano, alcançando o de 35 bilhões de litros de leite em 2016 (BNDES, 2013; BENAZZI, 2013; ZOCCAL, 2017).

Os estados com maior produção de leite no Brasil em 2016 foram Minas Gerais (6,1 bilhões de litros), Rio Grande do Sul (3,24), Paraná (2,74), Santa Catarina (2,43) e Goiás (2,31) (DEBONA, 2017). Pode-se observar na Tabela 1 a evolução da produção de leite no Brasil entre os anos de 1986 e 2016.

Tabela 1 - Produção de leite no Brasil nos anos de 1986 a 2016

Ano	Valor (toneladas)
1986	12.879.055
1990	14.933.430
1996	19.089.400
2000	20.379.988
2006	26.185.564
2010	30.715.460
2016	33.624.653

Fonte: FAO, 2017.

Nos últimos dez anos o crescimento econômico influenciou a grande parte das transformações na atividade leiteira no mundo ao pressionar em grande intensidade a demanda por lácteos e a expansão da produção de maneira geral. Neste período a produção cresceu em praticamente todos os principais países produtores (EMBRAPA, 2017). É possível observar na Tabela 2 a participação mundial dos principais países produtores de leite no ano de 2000 e no ano de 2015.

Tabela 2 - Países com maior produção de leite em 2000 e 2015

País	Produção - mil t	Vacas ordenhadas -mil cabeças		Produtividade - mil L / vaca		
	2000	2015	2000	2015	2000	2015
Estados Unidos da América	76.023	93.461	9.210	9.208	8.254	10.150
Índia	32.967	66.423	32.883	45.949	1.003	1.446
China	8.632	37.610	4.866	12.561	1.774	2.994
Brasil	20.380	35.124	17.885	23.028	1.140	1.525
Alemanha	28.331	32.395	4.628	4.296	6.122	7.541
Rússia	31.959	30.511	12.771	7.573	2.502	4.029
França	24.998	25.333	4.203	3.698	5.948	6.849
Nova Zelândia	12.235	21.317	3.337	5.176	3.666	4.119
Turquia	8.732	16.999	5.280	5.609	1.654	3.031
Reino Unido	14.488	15.050	2.354	1.851	6.155	8.131

Fonte: ZOCCAL, 2017.

A indústria de produtos lácteos é uma atividade importante no Brasil e contribui com 10 % do PIB (STRATE, 2014). Em 2016, o volume de leite captado pelas quinze maiores empresas de laticínios brasileiros foi de 9,67 bilhões de litros (MNP, 2017).

O processo de produção de produtos lácteos envolve várias etapas, conforme apresentado a seguir (FEAM, 2011).

a) Recepção e preparação do leite: O leite é recepcionado na indústria e passa por avaliações de qualidade. Se ocorrer reprovação, todo o conteúdo é descartado. Em seguida, o leite passa por processo de resfriamento, visando a redução no crescimento de bactérias.

b) Processamento: Os processos variam de acordo com o produto final desejado. De modo geral, segundo a EMBRAPA (2017), consiste nas operações de filtração, que extrai partículas grosseiras e impurezas; clarificação, onde ocorre centrifugação e retirada de impurezas; desnatamento para extração de gorduras; padronização, onde ocorre separação do leite e adequação do teor de gorduras; pasteurização, que consiste em exterminar os microrganismos patogênicos aquecendo o leite e o mantendo em determinada temperatura antes de resfriá-lo novamente, sendo que a temperatura e o tempo de aquecimento variam de acordo com a linha e o produto a ser produzido.

c) Produção: Essa etapa também depende do produto final desejado. Alguns exemplos que podem ser citados são o leite em pó, que é concentrado e depois desidratado; o leite UHT, que passa por processos de homogeneização e ultrapasteurização; e a manteiga passa por bateadeira.

d) Envase e embalagem: Para se evitar a contaminação do leite, o envase deve ocorrer em circuito fechado desde a montagem de embalagens herméticas até a dosagem do alimento, garantindo assim que o produto permaneça esterilizado. Prontos para a comercialização, após passar por todas as etapas anteriores, com rigorosos controles de qualidade nas diversas linhas de produção, os produtos são embalados e armazenados na temperatura e em local adequados.

e) Expedição: É a última etapa, antes dos produtos estarem disponíveis para consumo, onde estes são dispostos em caminhões com resfriamento e enviados ao local de destino.

### **3.1.1 Efluente da indústria de produtos lácteos**

Umas das principais características da indústria de laticínios é o consumo de grande quantidade de água para operações de processamento e limpeza, consequentemente, ocorre a geração de vazões elevadas de efluentes (1,1 a 6,8 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> leite processado) que são difíceis de tratar adequadamente devido a sua complexa composição, contendo nutrientes, poluentes orgânicos persistentes e agentes infectantes (SARAIVA et al., 2009).

Os efluentes líquidos gerados pelas indústrias de laticínios são compostos por leite e derivados diluídos, material sólido, graxas, detergentes e desinfetantes usados nas operações de limpeza, lubrificantes de máquinas e esgoto doméstico, se caracterizando pelos altos teores de matéria orgânica, óleos e graxas e sólidos suspensos. Entretanto, a variabilidade das características dos efluentes gerados é grande, tanto entre diferentes fábricas quanto entre diferentes períodos em uma mesma indústria (ANDRADE, 2011).

A indústria de lácteos gera efluente com altos níveis de matéria orgânica coloidal devido à presença de soro de leite, além de possuir elevados teores de sais dissolvidos e nutrientes. As propriedades do efluente bruto variam de acordo com a produção e as tecnologias utilizadas. O efluente gerado no processamento do leite tem uma DQO em torno de 3.000 mg L<sup>-1</sup>, esse valor pode chegar a 50.000 mg L<sup>-1</sup> durante a produção de queijo. Os métodos convencionais de tratamento de efluente lácteo falham quando há elevadas quantidades de proteínas e lipídios, resultando em um conjunto de problemas, como pH alcalino, coloração escura e altos níveis de DQO e DBO (MELCHORS et al., 2016).

Grande quantidade de efluente se origina nas diferentes operações. As substâncias orgânicas nos resíduos vêm na forma em que eles estavam presentes no leite, ou em uma forma degradada devido ao seu processamento. Como tal, o efluente lácteo, embora biodegradável, é de natureza muito forte. A limpeza e higienização dos caminhões-pipa e das instalações da empresa, as etapas de aquecimento e resfriamento utilizam grande quantidade

de água e, conseqüentemente, são grandes geradoras de efluentes (MIRJI; KALBURGI, 2014).

Nas etapas de limpeza são utilizados sanitizantes, soluções ácidas e alcalinas, que podem influenciar as características do efluente, principalmente o pH. Segundo Andrade (2011), além da lavagem da indústria e de equipamentos, os efluentes também são gerados devido à águas laboratoriais, derrames, vazamentos, transbordos e destruição de embalagens. Neste contexto, as indústrias lácteas apresentam como principal preocupação a geração de uma enorme quantidade de águas residuais (BALANNEC et al, 2002).

Se o efluente de uma indústria de produtos lácteos for lançado em corpos hídricos, pode ocorrer aumento de matéria orgânica, que favorece o ambiente para proliferação de microrganismos consumidores de oxigênio e pode alterar o pH e aumentar a turbidez da água. Além disso, os nutrientes presentes no efluente podem favorecer o desenvolvimento de algas em excesso, ocasionando eutrofização (POKRYWIECKI et al., 2013).

Dada à importância da indústria de laticínios no Brasil e o aspecto ambiental atrelado a atividade que desenvolve, pode ser necessária a adoção de metodologias preventivas, a fim de otimizar e gerar melhorias, evitando desperdícios (MORO; ADAMY, 2015).

Visando à redução dos custos e dos impactos ambientais relacionados ao consumo de água e tratamento de efluentes, a minimização do volume e da carga poluidora dos efluentes deve ser sempre priorizada (PARENTE; BARROS E SILVA, 2002).

O tratamento desse efluente tem sido uma das principais preocupações das indústrias, tanto para a proteção do meio ambiente como para atender as normas legais, além da possibilidade de reuso do efluente purificado. Problemas ambientais sérios podem surgir se as águas residuais lácteas não forem tratadas devidamente (HAMDANI; MOUNTADAR; ASSOBBEI, 2005; TOCCHI et al., 2013).

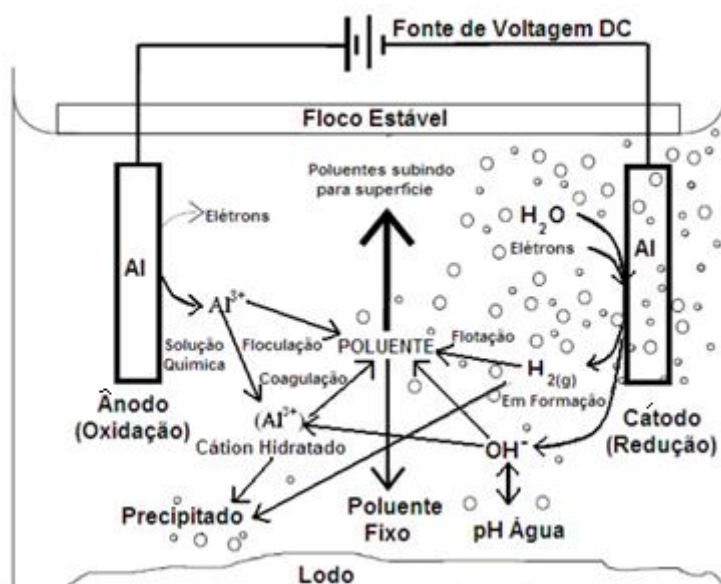
### 3.2 ELETROFLOCULAÇÃO

O processo da EF, também chamado de eletrocoagulação ou eletroflotação é essencialmente um processo eletrolítico que envolve a desestabilização de poluentes emulsificados, ou em suspensão, em meio aquoso pela aplicação de uma corrente elétrica (AQUINO NETO et al., 2011). Khemila et al. (2018) define a EF como um processo eletrolítico que consiste na dissolução de um eletrodo de sacrifício após a aplicação de uma corrente entre dois eletrodos para tratamento de águas residuais líquidas que contenham poluentes orgânicos. Basicamente, este processo ocorre em três etapas.

Na primeira etapa, o coagulante é gerado *in situ* pela oxidação de um ânodo metálico de sacrifício; assim que os respectivos cátions são gerados na fase anódica, estes reagem com moléculas de água para formação dos respectivos hidróxidos e poli-hidróxidos. Os materiais mais utilizados como ânodos de sacrifício são o Fe e o Al, devido a seu baixo custo, disponibilidade e eficácia. Paralelamente, tem-se a eletrólise da água e a formação de microbolhas de oxigênio no ânodo e hidrogênio no cátodo que carregarão, na última etapa, o material floculado para a superfície (AQUINO NETO et al., 2011).

A geração de coagulantes *in situ* e hidróxidos metálicos no anodo e bolhas de gás hidrogênio no catodo, para o Al, podem ser observadas na Figura 1.

Figura 1- Interações que ocorrem no processo de EF com eletrodo de Al



Fonte: HOLT et al., 2002.

Na segunda etapa, os hidróxidos formados adsorvem-se em partículas coloidais originando os flóculos e tem-se o transporte dessas espécies que entram em contato com as impurezas. A remoção dos poluentes pode ocorrer tanto por complexação como por atração eletrostática e posterior coagulação. Na terceira e última etapa do processo ocorre a formação das microbolhas que são geradas da eletrólise da água, que auxiliam na floculação e flotação de partículas, pois capturam ou envolvem os flocos formados arrastando partículas e impurezas em suspensão no meio até superfície, clarificando o efluente (AQUINO NETO et al., 2011; BELAN, 2014).

No processo de EF, os eletrodos geralmente estão conectados a uma fonte externa e um parâmetro importante é a seleção do material do eletrodo e o modo de combinação de

ânodo e cátodo. O material do eletrodo para tratamento de águas residuais não deve ser tóxico para a saúde humana e para o meio ambiente. Quando o Al e o Fe são usados como material de ânodo, os íons metálicos são liberados do ânodo e são formadas muitas espécies de hidrólise monomérica iônica, dependendo do pH da solução. As reações que ocorrem no eletrodos de Al estão descritas abaixo (KHANDEGAR; SAROHA, 2013).

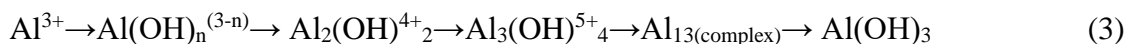
a) As reações de oxidação ocorrem no ânodo:



b) As reações de redução correm no cátodo:



c) A reação geral que ocorre durante a eletrólise:



Suas altas propriedades de adsorção conferem forte afinidade para partículas dispersas e poluentes dissolvidos. Finalmente, esses flocos de poluentes são removidos facilmente a partir de meio aquoso por sedimentação ou por flotação (AN et al., 2017; KHEMILA et al., 2018).

### 3.2.1 Parâmetros que influenciam no processo de EF

A eficiência do processo está relacionada ao controle de vários parâmetros, como a densidade da corrente e a tensão na célula, o tempo de tratamento, a distância entre os eletrodos, o pH, a temperatura do processo, o material dos eletrodos, a área submersa e a passivação dos eletrodos, entre outros, descritos sucintamente.

#### 3.2.1.1 Densidade de corrente

A densidade de corrente operacional é crítica na EF, visto que é o único parâmetro operacional que pode ser controlado diretamente. A densidade determina diretamente a

dosagem de coagulantes e taxas de geração de bolhas, bem como influencia fortemente na mistura da solução e transferência de massa nos eletrodos, além de aumentar o sobrepotencial cinético (HOLT; BARTON; MITCHELL, 2005).

A densidade de corrente de operação é o parâmetro operacional chave, afetando o tempo de resposta do sistema e influenciando fortemente o modo dominante de separação do poluente. Para qualquer aplicação específica, a densidade de corrente “ótima” envolverá invariavelmente uma relação entre custos operacionais e o uso eficiente do coagulante introduzido (HOLT; BARTON; MITCHELL, 2005).

O fornecimento de corrente elétrica para o sistema determina a quantidade de íons de  $\text{Al}^{3+}$  ou  $\text{Fe}^{2+}$  liberados de seus respectivos eletrodos. No entanto, quando uma alta corrente elétrica é utilizada, aumenta a chance de ocorrerem desperdícios de energia elétrica, a qual pode ser observada pelo aquecimento do efluente no reator (BENAZZI, 2013).

#### 3.2.1.2 Tempo de tratamento

O tempo de tratamento é o tempo no qual o efluente ou solução eletrolítica é submetido a uma intensidade de corrente entre os eletrodos imersos (COMBATT, 2014).

Quando o tempo de eletrólise aumenta, a concentração de íons e seus flocos de hidróxidos aumentam (CERQUEIRA; MARQUES; RUSSO, 2011).

#### 3.2.1.3 Distância entre os eletrodos

A distância entre os eletrodos pode contribuir significativamente na eficiência do processo de flotação, pois quanto mais afastados estão os eletrodos, a interação e a eficiência são menores, sendo necessário um aumento do tempo de tratamento ou da densidade de corrente para remoção das impurezas (STRATE, 2014).

A distância entre os eletrodos pode variar de acordo com as características do efluente a ser tratado, visando uma melhor eficiência no processo de tratamento. Deve existir um equilíbrio na distância, pois a aproximação excessiva das placas também pode ser ineficiente, dificultando a homogeneização do efluente. A distância pode ser maior quando o efluente possui alta condutividade (CRESPILHO; REZENDE, 2004 apud BENAZZI, 2013).



#### 3.2.1.4 pH

O desempenho do processo depende do pH da solução. O efeito do pH do efluente na EF está refletido pela eficiência da corrente, bem como a solubilidade de hidróxidos metálicos, como por exemplo o  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , responsáveis pela coagulação. Quando o pH está próximo a neutralidade, a potência consumida é maior em comparação com condições ácidas ou básicas, devido à variação da condutividade. Quando a condutividade é alta, o efeito do pH não é significativo (CHEN, 2004; BENAZZI, 2013).

É observado, com frequência, que a eficiência de corrente quando utilizado eletrodos de Al, é maior em condições ácidas e alcalinas que em condições neutras. Vale salientar que o desempenho do processo depende do tipo de poluente (CHEN, 2004).

#### 3.1.2.5 Passivação dos eletrodos

Se o eletrodo metálico está em contato com o ar, sobre a sua superfície ocorre a formação de um filme passivo, muito fino, de óxido, que faz com que o eletrodo não sofra corrosão facilmente. Quando ocorre a eletrólise, na região próxima ao cátodo há excesso de  $\text{OH}^-$ , que faz com que a superfície seja atacada por esses ânions e promovendo a formação de um filme passivo. Uma vez formado o filme passivo, o processo de EF pode estar comprometido pela perda de eficiência em decorrência do aumento da resistividade do eletrodo (CRESPILHO; REZENDE, 2004; FORNARI, 2007).

Um eletrodo pode ter sua vida útil acrescida em até 2 vezes e a resistividade diminuída pela inversão periódica de polaridade, que faz com que o eletrodo que se comporta como um cátodo por certo tempo passar a se comportar como um ânodo. Essa inversão reduz significativamente o impacto da passivação, que ainda é vista como uma limitação para a aplicação dessa técnica onde um baixo custo e baixa manutenção do tratamento de água e/ou efluentes são requeridas (MOLLAH et al. 2001; HOLT, BARTON, MITCHELL, 2005).

#### 3.1.2.6 Temperatura

A temperatura tem efeito positivo no processo de EF até 60 °C, devido à contribuição na destruição do filme passivo na superfície dos eletrodos. Quando a temperatura é maior que 60 °C resulta em flocos mais compactos, que são mais propensos a se depositar na superfície dos eletrodos. A temperatura também apresenta um efeito positivo em relação à condutividade

do efluente, permitindo assim, uma redução no consumo de energia (CHEN, 2004; BENAZZI, 2013).

### 3.1.2.7 Material dos eletrodos

Os eletrodos normalmente empregados na EF são de Al ou Fe. O ferro, em função do menor custo e por gerar coloração acentuada, é geralmente utilizado para o tratamento de águas residuais e o Al no tratamento de água potável. Devido à alta eficiência de coagulação dos íons  $Al^{3+}$ , este material também foi utilizado para o tratamento de águas residuais, isoladas ou em combinação com as placas de ferro. É necessário lavar com regularidade as superfícies das placas dos eletrodos, visando a remoção das incrustações (oxidação da placa), as quais interferem na eficiência do processo (SHEN et al., 2003 apud BENAZZI, 2013).

### 3.2.2 Vantagens e desvantagens da EF

Segundo Mollah et al. (2001) e Mohammad et al. (2004), a EF possui muitas vantagens, como:

- a) Os equipamentos necessários são simples e de fácil operação, em que a corrente e o potencial aplicado podem ser medidos e controlados de maneira automatizada;
- b) Em comparação com os processos físico-químicos convencionais, há um maior controle na liberação do agente coagulante;
- c) Os flocos que são formados são mais estáveis, podendo ser removidos por filtração simples;
- d) Remove as partículas coloidais menores, pois a corrente elétrica aplicada promove mais rapidamente o contato entre elas, facilitando a coagulação;
- e) Limita o uso de substâncias químicas, diminuindo o impacto negativo causado por xenobióticos em excesso no ambiente natural;
- f) As bolhas de gás produzidas durante a eletrólise levam o contaminante ao topo do reator, onde pode ser concentrado e facilmente removido;
- g) A célula eletrolítica é eletricamente controlada, não necessitando de dispositivos adicionais, o que requer menos manutenção;
- h) Remove óleos e graxas devido à facilidade de coagulação e flotação das moléculas desses compostos. Como consequência da interação dessas moléculas com o hidróxido de Al,

formam-se coloides com densidade inferior à densidade da água, e estes se deslocam naturalmente para a superfície do líquido;

i) A EF tem uma baixa produção de lodo devido ao teor de água mais baixo, comparada com o tratamento químico convencional.

j) Pode ser convenientemente usada em zonas rurais onde a eletricidade não é disponível, podendo ser usado um painel solar para fornecer a energia requerida pelo processo.

A técnica EF também possui desvantagens, sendo a principal delas a passivação dos eletrodos. Os eletrodos precisam ser substituídos regularmente, caso sofram passivação ou desgaste. O alto consumo de energia elétrica necessário para essa técnica de tratamento pode ser dispendioso em algumas regiões. Também pode ocorrer a formação de um filme de óxido impermeável no cátodo, conduzindo à perda de eficiência. Além disso, é necessário que o efluente tenha uma alta condutividade. Pode haver um residual de Al no efluente tratado (MOLLAH et al., 2001; CRESPILO, REZENDE, 2004).

### **3.2.3 EF aplicada no tratamento de diferentes efluentes industriais**

Tones (2015) aplicou a técnica de EF com eletrodos de Al na remoção de cor em misturas de corantes têxteis Azul Turquesa e Vermelho Escarlata, investigando o efeito da corrente elétrica, tempo de tratamento e Al dissolvido com relação à remoção da cor. Utilizando o tempo otimizado de 16 min e a corrente de 0,33 A, obteve-se uma porcentagem de remoção média acima de 90 % para ambos os corantes.

Kelm et al. (2014) aplicou a EF com eletrodos de Al para tratar efluente oriundo das lavanderias em Toritama, PE, tendo em vista a redução nos valores dos parâmetros de cor, turbidez e DQO, para posterior reuso ou descarte desse efluente nos cursos hídricos. O melhor resultado foi obtido considerando 12,0 V; 10,0 mm; 10 min e 25 °C, com redução de 91 % na cor, 88 % na turbidez e 43 % na DQO.

Cometti et al. (2014) investigou a eficiência de remoção de óleos e graxas e matéria orgânica de efluente oleoso oriundo de oficina de mecânica utilizando a técnica de EF com eletrodos de Al, um composto por placas maciças e outro por placas perfuradas. O tempo de detenção hidráulica foi de 30 min. A redução dos óleos e graxas foi de 81 % para o eletrodo maciço e 85 % para o eletrodo de placa perfurada. A redução da DQO foi 30 % para o eletrodo maciço e 67 % para o eletrodo de placa perfurada.

Gobbi (2013) utilizou a técnica de EF com eletrodos de Al para separar o óleo do efluente sintético. A média de remoção de óleos e graxas foi de 96 %, enquanto que a de DQO foi de 81 %, sendo que somente a distância entre os eletrodos foi o fator significativo. Já a variação de pH inicial não apresentou significância em relação as variáveis analisadas.

Carvalho, Souza e Zempulski (2015) utilizaram a EF para tratar efluente de indústria produtora de papel e celulose. A eficiência foi avaliada através dos parâmetros pH, condutividade, DQO e cor. O parâmetro que obteve uma maior alteração foi a cor, com redução de aproximadamente 9,5 vezes. Ceni et al. (2015) aplicou a EF com eletrodos de Fe em efluentes líquidos de laticínios, analisando remoção de cor, turbidez, nitrogênio total, sólidos totais e DQO. A técnica apresentou bons resultados na remoção dos parâmetros na condição de 14 V, 2,5 cm de distância entre os eletrodos e 15 min de tratamento, obtendo remoções de Cor, Turbidez, N total, DQO e ST de 93,3 %, 97,1 %, 72,8 % e 52,6 % respectivamente. Quanto maior a distância entre os eletrodos e a temperatura, maior foi a eficiência do tratamento.

Módenes et al. (2017) aplicou a técnica de EF para tratamento de efluentes de abatedouros de aves. O desempenho foi avaliado pela eficiência da remoção da cor, a turbidez e a DQO. As condições ótimas do processo foram obtidas para o pH inicial 8, tempo de eletrólise de 50 min e intensidade de corrente de 2 A, onde obteve remoção de 92 % para a DQO, 99,63 % para cor e 99,16 % para turbidez.

Os autores Santolini, Espinoza-Quinones e Souza (2015) buscaram determinar as condições ótimas para a redução da ciprofloxacina (CIP) utilizando o tratamento de EC, por meio de um reator de escala laboratorial montado com placas de Al. As melhores condições encontradas para o reator foram pH 3,0, corrente elétrica 1,0 A e tempo 90 min, onde pode-se obter a redução de 98 % da concentração de CIP na solução.

Nascimento et al. (2014) investiga a remoção de matéria orgânica de efluentes oleosos, medida em forma de DQO utilizando a EF como tecnologia de tratamento com eletrodos de Al. Após os testes pôde-se observar que ocorreu um acréscimo de pH e a “limpeza” da água, além disso, o eletrodo com maior área superficial propiciou a maior redução de carga orgânica em um tempo de retenção hidráulica de 30 min.

Biassio (2017) apresenta a aplicação do processo de EF com eletrodos de Al no tratamento de efluentes gerado em viveiro florestal da indústria de produção de eucalipto, analisando a DBO, DQO, turbidez, pH, condutividade elétrica, macronutrientes, micronutrientes e metais pesados. Os resultados mostram valores de redução de 80 % em DBO, 95 % em DQO, 99 % em turbidez, redução de 16 % em média na condutividade

elétrica, redução de concentração que variam de 15 % para o sódio até 100 % para o potássio, remoção de 100 % para os componentes chumbo e cromo. Observou-se também que ocorreu aumento no valor do pH de 7 para 9 em todos os efluentes tratados.

A EF é um método de tratamento atual e promissor, sendo utilizada com sucesso para o tratamento de águas residuais, particularmente eficaz para uma ampla gama de poluentes, como metais pesados, compostos orgânicos, microorganismos e vários outros (BASSALA et al., 2017; VERMA, 2017).

### 3.3 PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

Conforme a Resolução do CONAMA N° 430/2011, os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados diretamente nos corpos receptores após o devido tratamento e desde que obedeçam às condições, padrões e exigências dispostos nesta Resolução e em outras normas aplicáveis. Para verificar se um efluente se enquadra nos padrões, são realizadas análises para a determinação de diversos parâmetros, conforme descrito a seguir.

#### 3.3.1 Demanda Química de Oxigênio

A DQO corresponde à quantidade de oxigênio necessária para oxidar a fração orgânica de uma amostra que seja oxidável pelo permanganato ou dicromato de potássio em solução ácida. Uma das vantagens da DQO sobre a DBO é que permite respostas em tempo muito menor. Além disso, o teste DQO engloba não somente a demanda de oxigênio satisfeita biologicamente, mas tudo o que é susceptível a demandas de oxigênio, em particular os sais mineiras oxidáveis. Devido a isso, a determinação da DQO é preferível à DBO para análises de despejos industriais, sendo também cada vez mais usada em controle operacional (JORDÃO; PESSÔA, 1995).

O aumento da concentração de DQO num corpo d'água deve-se principalmente a despejos de origem industrial. A DQO é um parâmetro indispensável nos estudos de caracterização de esgotos sanitários e de efluentes industriais, sendo muito útil quando utilizada conjuntamente com a DBO para observar a biodegradabilidade de despejos (CETESB, 2009).

### 3.3.2 Demanda Bioquímica de Oxigênio

A DBO indica a quantidade de matéria orgânica presente, e é importante para se conhecer o grau de poluição do esgoto afluyente e tratado, para se dimensionar as estações de tratamento de esgotos, e medir sua eficiência. Quanto maior o grau de poluição orgânica, a maior DBO do corpo d'água; paralelamente, à medida que ocorre estabilização da matéria orgânica, decresce a DBO. A DBO mede a quantidade de oxigênio necessária para estabilizar biologicamente a matéria orgânica presente numa amostra, após um tempo dado (5 dias) e a uma temperatura padrão (20 °C) (JORDÃO; PESSÔA, 1995).

A DBO de uma água é a quantidade de oxigênio necessária para oxidar a matéria orgânica por decomposição microbiana aeróbia para uma forma inorgânica estável. Os maiores aumentos em termos de DBO, num corpo d'água, são provocados por despejos de origem predominantemente orgânica. A presença de um alto teor de matéria orgânica pode induzir ao completo esgotamento do oxigênio na água, provocando o desaparecimento de peixes e outras formas de vida aquática. Um elevado valor da DBO pode indicar um incremento da microflora presente e interferir no equilíbrio da vida aquática, além de produzir sabores e odores desagradáveis e, ainda, pode obstruir os filtros de areia utilizados nas estações de tratamento de água (CETESB, 2009).

### 3.3.3 Índice de biodegradabilidade

A relação DQO/DBO em um esgoto é uma indicação da possível presença de efluentes industriais, e da própria tratabilidade desse esgoto. Valores elevados dessa relação são indicativos de despejos industriais menos facilmente biodegradáveis. O inverso indica maior facilidade para o tratamento biológico (JORDÃO; PESSÔA, 1995).

Através da relação entre a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e a demanda química de oxigênio (DQO), é possível estimar a biodegradabilidade desses compostos e seu impacto ambiental em um corpo receptor. Quanto menor a relação DBO/DQO, ou seja, mais próxima de zero, menor a biodegradabilidade deste efluente e, conseqüentemente, maior o impacto sobre o meio ambiente (BRAGA et al., 2012).

Para determinar o índice de biodegradabilidade do efluente utiliza-se a seguinte equação:

$$\text{índice de biodegradabilidade} = \frac{DQO}{DBO} \quad (4)$$

Para os valores da relação entre DQO/DBO de 1,5 a 2,5 é aconselhável o tratamento biológico. Se os valores estão entre 2,5 e 3,5 indicam que o efluente não é muito biodegradável e devem ser realizados estudos de tratabilidade a fim de verificar a viabilidade do tratamento biológico ou não. Se o valor for maior que 3,5 aponta que há uma grande quantia de matéria inerte no efluente, não sendo adequado o tratamento biológico e sim o tratamento físico-químico (VON SPERLING, 2005).

É comum aplicar-se tratamentos biológicos para efluentes com relações DQO/DBO de 3/1, por exemplo. Mas valores muito elevados desta relação indicam grandes possibilidades de insucesso, uma vez que a fração biodegradável torna-se pequena, tendo-se ainda o tratamento biológico prejudicado pelo efeito tóxico sobre os microrganismos exercido pela fração não biodegradável. No entanto, deve-se observar que a relação DQO/DBO é diferente para os diversos efluentes e que, para um mesmo efluente, a relação altera-se mediante tratamento, especialmente o biológico. Desta forma, um efluente bruto que apresente relação DQO/DBO igual a 3/1, poderá, por exemplo, apresentar relação da ordem de 10/1 após tratamento biológico, que atua em maior extensão sobre a DBO (CETESB, 2009).

### 3.3.4 Óleos e graxas

Óleos e graxas estão sempre presentes nos esgotos domésticos, provenientes da preparação e do uso de alimentos (óleos vegetais, manteiga, carne, etc). Podem estar presentes também sob a forma de óleos minerais derivados do petróleo (querosene, óleo lubrificante), e neste caso têm origem em postos de gasolina ou indústrias. São identificados muitas vezes pelo nome genérico de gorduras (JORDÃO; PESSÔA, 1995).

Estas substâncias geralmente são hidrocarbonetos, gorduras, ésteres, entre outros. A determinação de óleos e graxas é feita através da fração da matéria orgânica solúvel em hexanos, consistem no conjunto de substâncias que consegue ser extraído da amostra por determinado solvente e que não se volatiliza durante a evaporação do solvente a 100 °C. Os despejos de origem industrial são os que mais contribuem para o aumento de matérias graxas nos corpos d'água, entre eles os de refinarias, frigoríficos, saboarias etc. A pequena solubilidade dos óleos e graxas constitui um fator negativo no que se refere à sua degradação em unidades de tratamento de despejos por processos biológicos e causam problemas no

tratamento d'água quando presentes em mananciais utilizados para abastecimento público (CETESB, 2009).

Em corpos hídricos, os óleos e graxas acumulam-se nas superfícies, podendo trazer sérios problemas ecológicos por dificultar as trocas gasosas que ocorrem entre a massa líquida e a atmosfera, especialmente a de oxigênio. Ressalta-se que um litro de óleo pode poluir um milhão de litros de água (ORSSATTO; HERMES; BOAS, 2010).

### **3.3.5 Condutividade elétrica**

A condutividade elétrica é a capacidade que um líquido possui de conduzir corrente elétrica. Este parâmetro está relacionado com a presença de íons (partículas carregadas eletricamente) dissolvidos na água. O parâmetro condutividade pode contribuir para possíveis reconhecimentos de impactos ambientais que ocorram na bacia de drenagem ocasionados por lançamentos de resíduos industriais, mineração, esgotos, entre outros (SANTANA et al., 2011).

A condutividade do efluente deverá ser diretamente proporcional à quantidade de íons condutores presentes no líquido. Quanto maior for a concentração de íons no efluente, maior será sua capacidade de condução de corrente elétrica e maior será a possibilidade de ocorrência de reações entre as substâncias presentes no efluente (CERQUEIRA, 2006).

### **3.3.6 Turbidez**

A turbidez representa o grau de interferência com a passagem da luz através da água, conferindo uma aparência turva à mesma. Os sólidos em suspensão são os constituintes responsáveis. Esse parâmetro pode ter origem natural, devido a partículas de rocha, argila, silte, algas e microrganismos, ou pode ter origem antropogênica, devido a despejos domésticos, despejos industriais e erosão. Em corpos d'água, pode reduzir a penetração de luz, prejudicando a fotossíntese (VON SPERLING, 2005).

O tamanho das partículas responsáveis pela turbidez varia muito, desde grosseiras a colóides, de acordo com o nível de turbulência do corpo hídrico. A presença destas partículas provoca a dispersão e a absorção da luz, deixando a água com aparência turva, esteticamente indesejável e potencialmente perigosa, pois pode prejudicar a fotossíntese das algas e plantas aquáticas submersas. Partículas em suspensão localizadas próximo à superfície podem



absorver calor adicional da luz solar, aumentando a temperatura da camada superficial da água (NOGUEIRA; COSTA; PEREIRA, 2015).

A turbidez é causada pela presença de matéria em suspensão, enquanto é possível identificar por meio de uma água com cor, a turbidez impede a passagem de luz. Os efluentes geralmente apresentam cor e turbidez elevados (JORDÃO; PESSÔA, 1995).

### **3.3.7 Cor Aparente**

O parâmetro da cor é responsável pela coloração da água e/ou do efluente e a forma do constituinte responsável são os sólidos dissolvidos. A cor pode ter origem natural, devido a decomposição da matéria orgânica, ou de origem antropogênica, devido a resíduos industriais e esgotos domésticos, podendo ou não apresentar toxicidade. Deve ocorrer a distinção entre cor aparente e cor verdadeira, em que no valor da cor aparente pode estar incluída uma parcela devida à turbidez da água. Quando esta é removida por centrifugação, obtém-se a cor verdadeira (VON SPERLING, 2005).

A cor é causada por matéria em solução na água. É determinada por métodos colorimétricos. Esse parâmetro é de interesse em relação ao aspecto estético, assumindo uma importância maior quando se tem objetivo de reuso do efluente tratado, ou quando o efluente é lançado em corpos d'água onde os aspectos estéticos ou de recreação são mais importantes (JORDÃO; PESSÔA; 1995).

### **3.3.8 Absorvância $\lambda$ - 254 nm**

A absorvância de uma solução ou efluente é a medida de luz, em um determinado comprimento de onda, que é absorvida pelos constituintes em uma solução, em uma extensão determinada. Normalmente é medida em um espectrofotômetro em  $\lambda$ - 254 nm, para a extensão de 1,0 cm (JORDÃO; PESSÔA, 1995).

Muitos compostos orgânicos presentes em efluentes possuem um alto grau de aromaticidade, um grande número de ligações duplas e triplas e grupos funcionais fenólicos e, pelo fato destes possuírem a capacidade de absorver radiação ultravioleta, a determinação da absorvância de uma amostra  $\lambda$ - 254 nm torna-se um parâmetro potencial na determinação de carbono orgânico, podendo ser efetuada com a utilização de um espectrofotômetro (ANDRADE et al., 2003).

### 3.3.9 pH

É um parâmetro importante no controle operacional das estações de tratamento, principalmente na digestão anaeróbia e nos processos oxidativos. A legislação estabelece também valores limites para lançamento dos esgotos nos corpos d'água, e os regulamentos das empresas concessionárias para lançamento nas redes coletoras. Para a existência de vida aquática nos corpos hídricos, é necessário uma faixa de pH de 6 a 9, em geral. O pH pode ser medido com “papel de pH”, que em contato com a amostra tem sua cor alterada para uma coloração correspondente ao pH respectivo. Também, pode ser medido com um pHmetro, de mesa ou portátil (JORDÃO; PESSÔA, 1995).

O pH indica a condição de acidez, alcalinidade ou neutralidade. Valores de pH baixo causam potencial corrosividade e agressividade nas tubulações, pH elevado tem possibilidade de incrustações nas tubulações e valores de pH afastados da neutralidade podem afetar a vida aquática e os microrganismos responsáveis pela degradação biológica (VON SPERLING, 2005).

### 3.3.10 Temperatura

A temperatura mede a intensidade de calor e pode ter origem natural, com a transferência de calor por radiação, condução e convecção, ou origem antropogênica, devido às águas de torres de resfriamento e despejos industriais (VON SPERLING, 2005).

A temperatura é um parâmetro físico de grande importância, uma vez que afeta a saturação de oxigênio dissolvido nos corpos d'água, as taxas das reações biológicas e das reações químicas. É importante no tratamento biológico, devendo os parâmetros típicos de projeto serem corrigidos de acordo com a temperatura. Enquanto a concentração de saturação de OD diminui com o aumento de temperatura, a atividade biológica cresce com o seu aumento, existindo uma faixa ótima para esta atividade, de 25 a 35 °C. Abaixo de 15 °C a digestão anaeróbia praticamente não se processa (JORDÃO; PESSÔA, 1995).

### 3.3.11 Oxigênio Dissolvido

O OD é de essencial importância para os organismos aeróbios. Durante a estabilização da matéria orgânica, as bactérias fazem uso do oxigênio nos seus processos respiratórios, podendo vir a causar uma redução da sua concentração no meio. Dependendo da magnitude

deste fenômeno, podem vir a morrer diversos seres aquáticos, inclusive os peixes. Caso o oxigênio seja totalmente consumido, têm-se as condições anaeróbias, com possível geração de maus odores. O OD é vital para seres aquáticos aeróbios e é o principal parâmetro de caracterização dos efeitos da poluição das águas por despejos orgânicos (VON SPERLING, 2005).

O OD é o parâmetro de melhor caracterização da qualidade de um corpo da água, existindo uma concentração de saturação em água que é função da temperatura, da salinidade e da altitude. A temperatura assume um papel importante, já que as taxas das reações bioquímicas apresentam-se maiores com a elevação da temperatura, enquanto de maneira oposta a concentração de saturação de OD se reduz (JORDÃO; PESSÔA, 1995).

### **3.3.12 Série de sólidos**

Os sólidos nas águas correspondem a toda matéria que permanece como resíduo, após evaporação, secagem ou calcinação da amostra a uma temperatura pré-estabelecida durante um tempo fixado (CETESB, 2009).

A série de sólidos pode ser classificada em vários tipos, como sólidos totais (ST), sólidos suspensos (SS), sólidos dissolvidos (SD), podendo ser totais, fixos e voláteis, e sólidos sedimentáveis (SSed).

a) Sólidos totais: podem ser orgânicos ou inorgânicos, a origem pode ser a partir de efluentes industriais e domésticos, erosão e infiltração. A água é o componente que entra em maior proporção na composição do leite, e com a exclusão dela, os demais componentes constituem a fração denominada sólidos totais (HARTMANN, 2002; BILA, 2007).

b) Sólidos suspensos: são os sólidos com diâmetro de partícula maior ou igual a 1,2 µm que podem causar o desenvolvimento de depósitos de lodo e condições anaeróbias em efluentes, quando descartados em corpos hídricos sem tratamento adequado (PIVELI, 2013; BENVENUTI, 2013).

c) Sólidos dissolvidos: são constituídos principalmente de sais inorgânicos, além de pequenas quantidades de matéria orgânica (ABNT NBR 14550, 2015).

d) Sólidos sedimentáveis: É a porção dos sólidos em suspensão que se sedimenta sob a ação da gravidade (PIVELI, 2013).

e) Sólidos fixos e voláteis: Em geral, presume-se que os sólidos voláteis são matéria orgânica, apesar de alguns materiais orgânicos não queimarem e alguns sólidos inorgânicos

serem consumidos em altas temperaturas. Sólidos fixos incluem o resíduo que permanece depois da amostra ter sido inflamada (BENVENUTI, 2013).

### 3.4 LEGISLAÇÃO AMBIENTAL

Para regulamentar e reduzir ao mínimo os impactos de poluentes no meio ambiente, a legislação brasileira estabelece determinações, fiscaliza e prevê punições e multa a quem não segue as medidas de proteção ao ambiente.

O conhecimento da legislação ambiental em geral é um importante instrumento para a proteção do meio ambiente. As normas legais são muito abrangentes, versando sobre os mais diversos temas ambientais. Para o lançamento de efluentes industriais, por exemplo, é necessário o atendimento dos padrões de lançamento de efluentes nos corpos hídricos superficiais estabelecidos pelas Resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) em nível federal e por Conselho Estadual do Meio Ambiente (CONSEMA) em esfera estadual. A legislação estabelece que os efluentes industriais sejam submetidos a processo de tratamento antes do lançamento em recursos hídricos para evitar contaminações mais sérias (BARRETO, 2009).

A Resolução N° 357/2005 do CONAMA dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.

A Resolução N° 430/2011 do CONAMA dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução N° 357/2005, do CONAMA.

A Resolução N° 128/2006 do Conselho Estadual do Meio Ambiente (CONSEMA) do Rio Grande do Sul dispõe sobre a fixação de Padrões de Emissão de Efluentes Líquidos para fontes de emissão que lancem seus efluentes em águas superficiais no Estado do Rio Grande do Sul.

Na Tabela 3, observa-se os padrões estabelecidos nas três Resoluções para fins de comparação e complementação.

Tabela 3 - Valores dos padrões para lançamento de efluentes em corpos hídricos Classe II

Parâmetros	Resolução Nº357/2005 do CONAMA	Resolução Nº430/2011 do CONAMA	Resolução Nº128/2006 do CONSEMA
pH	5,00 a 9,00	5,00 a 9,00	6,00 a 9,00
Óleos e graxas minerais (mg L <sup>-1</sup> )	≤ 20,00	≤ 20,00	≤ 10,00
Óleos e graxas vegetais (mg L <sup>-1</sup> )	≤ 50,00	≤ 50,00	≤ 30,00
Materiais sedimentáveis (mg L <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )	≤ 1,00	≤ 1,00	≤ 1,00
Temperatura (°C)	≤ 40,00	≤ 40,00	≤ 40,00
Materiais flutuantes	ausente	ausente	ausente
Cor (u.C)	≤ 75,00	-	Não deve conferir coloração ao corpo receptor
Turbidez (UNT)	≤ 100,00	-	-
DQO (mg L <sup>-1</sup> )	-	-	-
DBO (mg L <sup>-1</sup> )	5,00	-	-
Condutividade (us cm <sup>-1</sup> )	-	-	-
OD (mg L <sup>-1</sup> O <sub>2</sub> )	> 5,00	> 5,00	-

Fonte: Adaptado da Resolução do CONAMA Nº 357/05, CONAMA Nº430/11 e CONSEMA Nº 128/06.

Para efluentes líquidos de fontes poluidoras, exceto efluentes líquidos domésticos, fica estabelecida a variação dos padrões de emissão para DBO<sub>5</sub>, DQO e SS, conforme as faixas de vazão apresentadas na Tabela 4, segundo a CONSEMA.

Tabela 4 - Padrões de emissão estabelecidos pela Resolução Nº 128/2006 no estado do Rio Grande do Sul

Faixa de vazão (m <sup>3</sup> dia <sup>-1</sup> )	DBO <sub>5</sub> (mgL <sup>-1</sup> )	DQO (mgL <sup>-1</sup> )	SS (mg L <sup>-1</sup> )
Q < 20	180,00	400,00	180,00
20 ≤ Q < 100	150,00	360,00	155,00
100 ≤ Q < 500	110,00	330,00	125,00
500 ≤ Q < 1.000	80,00	300,00	100,00
1000 ≤ Q < 3.000	70,00	260,00	80,00
3000 ≤ Q < 7.000	60,00	200,00	70,00
7000 ≤ Q < 10.000	50,00	180,00	60,00
10000 ≤ Q	40,00	150,00	50,00

Notas: (Q) vazão, (SS) sólidos suspensos

Fonte: Adaptado da Resolução do CONSEMA Nº 128/06.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização dos procedimentos experimentais e análises laboratoriais, utilizou-se a infraestrutura do Laboratório de Águas e Ecotoxicologia e Laboratório de Química Instrumental, ambos localizados na Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), *campus* Cerro Largo/RS.

### 4.1 EFLUENTE

O efluente utilizado nesse estudo é proveniente de uma indústria de produtos lácteos localizada na cidade de Cruz Alta, Rio Grande do Sul e foi coletado no mês de maio de 2017. A indústria produz leite em pó, leite *UHT* (*ultra high temperature*), leite em pó zero lactose, creme de leite zero lactose, creme de leite e bebida láctea *UHT* sabor chocolate.

O efluente bruto, sem tratamento, foi coletado no tanque de equalização da estação de tratamento da indústria em um volume de 50 litros, armazenado em bombona de polietileno. Na Figura 2, observa-se o efluente de indústria de lácteos bruto.

Figura 2 – Efluente bruto de indústria de lácteos

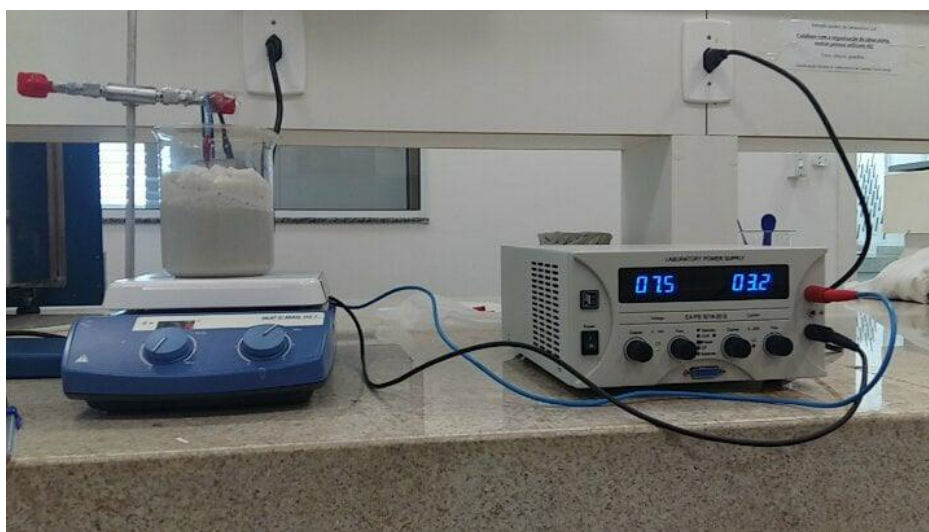


Fonte: elaborado pelo autor.

## 4.2 MÓDULO EXPERIMENTAL

Para o processo de EF, utilizou-se um reator eletroquímico (batelada) em escala laboratorial composto por uma fonte de alimentação de energia elétrica (marca: *Laboratory Power Supply*/modelo EA-PS 3016-20 B), um béquer com capacidade para 1 L de efluente, agitador magnético (marca: IKA/modelo C-MAG HS 7 S32) e um par de eletrodos de Al com dimensões de 10x05 cm. O módulo experimental pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 - Reator eletroquímico (batelada)



Fonte: elaborado pelo autor.

## 4.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Durante o procedimento foram utilizados dois eletrodos de sacrifício de Al com uma área ativa (submersa) de 25 cm<sup>2</sup> em cada eletrodo. O par de eletrodos estavam isolados eletricamente por borracha sintética a uma distância de 1 cm. O volume de efluente estabelecido para tratamento foi 500 mL a uma agitação de 4 RPM, escolhida a partir de testes preliminares, e sob temperatura ambiente de 25 ± 3 °C. A condutividade do efluente foi ajustada por meio da adição de NaCl (marca: *ALPHATEC*).

Ao fim do processo, o tempo de estabilização adotado, para posterior coleta e análise do efluente eletrofloculado, foi fixado em 20 min.

#### 4.4 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Para o planejamento experimental desse estudo utilizou-se o Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) (RODRIGUES, LEMMA, 2009). Foram trabalhadas três variáveis independentes: corrente elétrica (i), pH inicial e o tempo de tratamento (t).

Realizou-se um planejamento fatorial completo  $2^3$ , incluindo 6 pontos axiais e 3 repetições nos pontos centrais, totalizando 17 ensaios. A eficiência da EF foi baseada na remoção de cor, turbidez, DQO e absorvância  $\lambda$ -254 nm. Na equação 5, tem-se o modelo geral que permite a obtenção de uma condição otimizada para cada um dos parâmetros de análise.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3 + \beta_{123} X_1 X_2 X_3 + \varepsilon \quad (5)$$

Em que,  $X_1$ ,  $X_2$ , e  $X_3$  são as variáveis codificadas,  $\beta_0$ ,  $\beta_i$ ,  $\beta_{ii}$ ,  $\beta_{ij}$  e  $\beta_{ijk}$  são os parâmetros do modelo de regressão e  $\varepsilon$  representa o erro experimental.

Na Tabela 5 estão expressos os valores codificados das variáveis independentes. Ressalta-se que os valores das variáveis independentes foram definidos a partir de testes preliminares com o efluente de indústria de lácteos.

Tabela 5 - Níveis estudados para as variáveis independentes da matriz de delineamento experimental

Variáveis independentes		Códigos	-1,68	-1	0	1	1,68
pH	$X_1$		3,50	4,50	6,00	7,50	8,50
i (A)	$X_2$		0,32	1,00	2,00	3,00	3,68
t (min)	$X_3$		9,80	15,00	30,00	45,00	55,20

Fonte: elaborado pelo autor.

No Quadro 1 está representada a matriz do delineamento experimental.



Quadro 1 - Matriz do Delineamento Experimental

	Ensaio	Variáveis codificadas			Variáveis independentes		
		X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	pH	i (A)	t (min)
Pontos fatoriais	1	-1	-1	-1	4,50	1,00	15,00
	2	1	-1	-1	7,50	1,00	15,00
	3	-1	1	-1	4,50	3,00	15,00
	4	1	1	-1	7,50	3,00	15,00
	5	-1	-1	1	4,50	1,00	45,00
	6	1	-1	1	7,50	1,00	45,00
	7	-1	1	1	4,50	3,00	45,00
	8	1	1	1	7,50	3,00	45,00
Pontos axiais	9	-1,68	0	0	3,50	2,00	30,00
	10	1,68	0	0	8,50	2,00	30,00
	11	0	-1,68	0	6,00	0,32	30,00
	12	0	1,68	0	6,00	3,68	30,00
	13	0	0	-1,68	6,00	2,00	9,80
	14	0	0	1,68	6,00	2,00	55,20
Pontos centrais	15	0	0	0	6,00	2,00	30,00
	16	0	0	0	6,00	2,00	30,00
	17	0	0	0	6,00	2,00	30,00

Fonte: elaborado pelo autor.

A influência dos parâmetros independentes, i (A), pH inicial e t (min), foi determinada a partir da eficiência de remoção dos parâmetros respostas ou dependentes: cor, turbidez, DQO e absorvância  $\lambda$ - 254 nm. A partir dos modelos empíricos obtidos com o DCCR, realizou-se a otimização do processo de tratamento, maximizando a eficiência de remoção das variáveis respostas.

#### 4.5 CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE

Realizou-se a caracterização inicial do efluente de indústria láctea bruto por meio da análise dos parâmetros físico-químicos. A metodologia utilizada está de acordo com os procedimentos descritos no *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005), conforme especificado na Tabela 6. Ressalta-se que todos os parâmetros foram novamente analisados após a EF utilizando as condições de tempo de tratamento, corrente elétrica e pH otimizadas.

Tabela 6 - Parâmetros físico-químicos analisados

Parâmetro	Equipamento	Referência metodológica
Absorvância $\lambda$ - 254 nm (u.a.)	Espectofotômetro UV-Visível – Evolution 201	5910 B APHA (2005)
Condutividade (uS cm <sup>-1</sup> )	Condutivímetro Digmed – DM 32	2510 B APHA (2005)
Cor aparente (u.C)	Colorímetro Del Lab – DLA-COR	2120 APHA (2005)
DBO (mg L <sup>-1</sup> )	BODTrak II - Hach	5210 B APHA (2005)
DQO (mg L <sup>-1</sup> )	-	5220 B APHA (2005)
OD (mg L <sup>-1</sup> O <sub>2</sub> )	Sonda YSI Professional Plus	4500 G APHA (2005)
Óleos e graxas (g L <sup>-1</sup> )	-	5520 D APHA (2005)
pH	pHmetro MS Tecnozon – mPA 210	4500 APHA (2005)
Turbidez (UNT)	Turbidímetro MS Tecnozon – TB 1000P	2130 B APHA (2005) 2540 B, C, D e E
SS (mg L <sup>-1</sup> )	Método gravimétrico	APHA (2005)
SSed (mg L <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )	Cone de Imhoff	2540 F APHA (2005)
Temperatura (°C)	Sonda YSI Professional Plus	2550 B APHA (2005)

Notas: (APHA) *American Public Health Association*, 2005. Fonte: elaborado pelo autor.

#### 4.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para a análise estatística dos resultados da matriz DCCR utilizou-se o software Microsoft Excel 2007 e o programa Statistica® 7 para realizar a análise de variância (ANOVA), e obter a representação gráfica do modelo, por meio de gráfico de superfície de resposta e perfil de contorno que auxilia na determinação da região ótima de operação para EF.

Uma vez que o modelo é válido para as variáveis respostas, será aplicada a função de desejabilidade global, disponível no programa Statistica® 7. Esta função baseia-se no preceito de que a qualidade de um processo que tem muitos recursos é completamente inaceitável, se um deles estiver fora de um limite "desejável", tendo como objetivo encontrar condições que possam garantir a conformidade com os critérios de todas as variáveis respostas e, também, fornecer o melhor valor na resposta, sendo esse valor o mais desejável, convertendo as variáveis respostas em uma única, combinando as respostas individuais em uma função composta, seguida por sua otimização (CANDIOTI et al., 2014).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção encontram-se os resultados e discussões obtidos no estudo em relação a caracterização do efluente de indústria de lácteos, a análise estatística para obter as condições otimizadas, a eficiência de remoção nestas condições e a validação do modelo proposto.

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE

Na Tabela 7, observa-se a caracterização físico-química do efluente bruto proveniente de indústria de lácteos. Comparando os valores obtidos com as resoluções do CONSEMA N° 128 e do CONAMA N° 357 e N° 430, pode-se observar que o efluente possui parâmetros em desconformidade com os padrões para lançamento dos efluentes, tais como DBO, DQO, turbidez, óleos e graxas, OD, pH, sólidos suspensos e cor, demonstrando a necessidade um tratamento antes do lançamento em um corpo hídrico receptor, de forma a atender as exigências ambientais.

Tabela 7 - Caracterização físico-química do efluente bruto

Parâmetro	Valor
DBO (mg L <sup>-1</sup> )	430,00 ± 0,00
DQO (mg L <sup>-1</sup> )	7.462,92 ± 86,49
Cor (u.C)	14.350,00 ± 353,00
Turbidez (UNT)	1.640,00 ± 14,14
Temperatura (°C)	25,00 ± 2,00
Condutividade (uS cm <sup>-2</sup> )	8,90 ± 0,01
Absorvância λ- 254 nm (u.a.)	4,52 ± 0,03
pH	12,74 ± 0,03
OD (mg L <sup>-1</sup> O <sub>2</sub> )	0,76 ± 0,07
Óleos e graxas (mg L <sup>-1</sup> )	880,00 ± 197,00
SSed (mg L <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )	0,00
ST (mg L <sup>-1</sup> )	10.685,00 ± 1.067,00
STF (mg L <sup>-1</sup> )	3.400,00 ± 98,00
STV (mg L <sup>-1</sup> )	7.285,00 ± 968,00
SST (mg L <sup>-1</sup> )	2.000,00 ± 424,00
SSF (mg L <sup>-1</sup> )	250,00 ± 140,00
SSV (mg L <sup>-1</sup> )	1.750,00 ± 565,00
SDT (mg L <sup>-1</sup> )	8.685,00 ± 643,00
SDF (mg L <sup>-1</sup> )	3.150,00 ± 42,00
SDV (mg L <sup>-1</sup> )	5.535,00 ± 403,00

Fonte: elaborado pelo autor.

A temperatura do efluente bruto está de acordo com as Resoluções N° 430 do CONAMA e N° 128 do CONSEMA que estipulam um valor máximo de 40 °C do efluente para possibilitar lançamento em corpo hídrico.

O efluente bruto não apresenta sólidos sedimentáveis, também atendendo a legislação nesse parâmetro. Silva, D. (2011) encontrou uma faixa de valores para sólidos sedimentáveis em efluente lácteo, variando de 0,4 a 60 ml L<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> para produção de leite pasteurizado, manteiga, requeijão, doce de leite e queijos; 0,5 a 15 ml L<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> para produção de queijos diversos; 0,4 a 0,6 ml L<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> para produção de leite pasteurizado, requeijão, ricota, manteiga e queijos; e 1,4 a 2,3 ml L<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> para produção de queijos diversos.

Os sólidos totais, suspensos e dissolvidos foram detectados em grandes quantidades na caracterização do efluente, e pode estar atrelado a presença de coágulos de leite, ou outros aditivos. Segundo as Resoluções do CONAMA N° 357/05 e N° 430/11 e CONSEMA N° 128/06, o efluente não deve possuir materiais flutuantes. Quanto aos sólidos suspensos, o efluente está em desacordo com o valor máximo estipulado na Resolução CONSEMA N° 128/2006. A perda de gorduras provenientes do leite, que correspondem a 90 % da quantidade de gorduras totais do efluente (ANDRADE, 2011) também contribui para elevada concentração de sólidos. A predominância de sólidos voláteis pode indicar a presença de matéria orgânica no efluente (ANDRADE, 2011; SARAIVA et al., 2009).

O parâmetro da turbidez apresentou um valor de 1640 ± 14,14 UNT. Este valor está acima do máximo estipulado pelas Resoluções N° 357 e N° 430 do CONAMA, que determinam o aceitável como sendo até 100 UNT. Esse valor pode ser atribuído à elevada quantidade de sólidos em suspensão do efluente (VON SPERLING, 2005; ANDRADE, 2011; POKRYWIECKI et al., 2013).

O parâmetro pH está em desacordo com a faixa permitida para o lançamento do efluente em um corpo hídrico de Classe II, conforme Resoluções N° 357 e N° 430 do CONAMA e N° 128 do CONSEMA. A Classe II foi escolhida devido a maioria dos corpos hídricos do Rio Grande do Sul estarem enquadrados nessa classe. Valores de pH altos podem estar relacionados ao emprego de substâncias alcalinas no processo de limpeza, como os que contém carbonato de sódio ou bicarbonato de sódio, soda cáustica (hidróxido de sódio), amoníaco, hipoclorito de sódio, entre outros (POKRYWIECKI et al., 2013; SARAIVA et al., 2009).

A Resolução N° 128 da CONSEMA estabelece que a cor verdadeira do efluente não deve alterar a coloração do corpo receptor e a Resolução N° 357 do CONAMA estabelece que

a cor verdadeira não deve ultrapassar 75 u.C. O efluente de lácteos bruto possui cor acima do permitido. Esse valor pode ser devido a sólidos suspensos em grande quantidade, partículas coloidais, em virtude das lavagens das máquinas e equipamentos, substâncias dissolvidas do processo de tratamento, pode ser resultado da decomposição da matéria orgânica ou da presença de íons metálicos naturais (BENAZZI, 2013; AZZOLINI; FABRO, 2013; SILVA et al., 2016; MACULAN et al., 2016).

O efluente bruto apresentou baixa condutividade elétrica. As Resoluções que determinam os padrões de lançamento de efluentes em corpos hídricos não possuem valores para o parâmetro da condutividade estipulados. Entretanto a CETESB (2009) estipula que valores superiores a  $100 \text{ uS cm}^{-1}$  indicam que o ambiente está impactado (SILVA, K., 2007).

O elevado valor de DQO do efluente bruto indica presença de conteúdo orgânico e uma alta concentração de substratos fermentáveis com odores desagradáveis persistentes, estando em desacordo com o máximo estipulado pela Resolução da CONSEMA Nº 128/2006. Elevadas quantidades de proteínas e lipídios podem estar presentes, que resultam nos altos níveis de DQO e de DBO (SHARMA, 2014; DALLAGO et al., 2012; MELCHORS et al., 2016).

O OD está abaixo do valor mínimo estipulado nas Resoluções Nº 357 e Nº 430 do CONAMA ( $> 5 \text{ mg L}^{-1} \text{ O}_2$ ). Águas poluídas apresentam baixa concentração de OD, devido ao seu consumo na decomposição de compostos orgânicos. O autor Vale (2009) observou um valor médio de OD para efluentes lácteos de  $0,42 \text{ mg L}^{-1} \text{ O}_2$ .

O parâmetro de óleos e graxas de origem animal ou vegetal também está em desacordo com o estabelecido na legislação, apresentando um valor muito superior, que pode ser atribuído a alta carga de matéria orgânica, aos resíduos de produção do leite e excesso de nutrientes (ANDRADE, 2011; SARAIVA et al., 2009; UM; OZEL, 2013).

Para conhecer a região de máxima absorção do efluente lácteo e determinar os compostos presentes, realizou-se o espectro de absorção no comprimento de onda  $\lambda$ - 200 a 900 nm. A maior absorvância foi detectada no comprimento de onda de 310 nm, que corresponde ao grupo de compostos aromáticos, que absorvem na faixa de 190 a 380 nm (KOPLIK, 2013).

O índice de biodegradabilidade é de 15,37. Conforme Von Sperling (2005), para valores da relação entre DQO/DBO acima de 3,5 aponta-se a necessidade de um tratamento físico-químico, visto que há uma grande quantia de matéria inerte no efluente, não sendo adequado o tratamento biológico. O valor obtido para o índice de biodegradabilidade justifica esse estudo.

## 5.2 APLICAÇÃO DA EF PARA O TRATAMENTO DO EFLUENTE DE INDÚSTRIA DE LÁCTEOS

### 5.2.1 Eficiência na remoção de DQO, turbidez, cor aparente e absorvância $\lambda$ -254 nm

Tendo como objetivo a verificação da eficiência do tratamento de EF com uso de eletrodos de sacrifício de Al aplicado no efluente de produtos lácteos, a porcentagem média de remoção para as variáveis dependentes DQO, turbidez, cor aparente e absorvância  $\lambda$ -254 nm foi calculada para cada ensaio proposto. Os resultados obtidos podem ser observados no Quadro 2, a seguir.

Quadro 2 - Resultado da remoção média (%) dos parâmetros analisados após a EF

Ens.	Variáveis codificadas			Variáveis independentes			Variáveis dependentes (% de remoção)			
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	pH	I (A)	T (min)	Turb.	Cor Ap.	Abs;	DQO
1	-1	-1	-1	4,5	1	15	70,21±0,04	34,7±0,49	3,18±0,42	53,40±3,40
2	1	-1	-1	7,5	1	15	93,47±0,07	94,8±0,09	38,78±0,21	48,76±5,22
3	-1	1	-1	4,5	3	15	97,47±0,00	97,86±0,01	62,92±0,12	57,42±9,08
4	1	1	-1	7,5	3	15	98,69±0,04	97,96±0,02	56,64±0,05	56,15±7,53
5	-1	-1	1	4,5	1	45	92,96±0,04	98,82±0,01	65,02±0,08	72,68±2,27
6	1	-1	1	7,5	1	45	82,65±0,04	96,73±0,01	41,13±0,08	56,62±10,22
7	-1	1	1	4,5	3	45	93,66±0,08	99,36±0,01	75,00±0,03	73,35±3,58
8	1	1	1	7,5	3	45	98,54±0,00	98,57±0,01	60,51±0,05	69,06±0,56
9	-1,68	0	0	3,5	2	30	93,02±0,04	99,3±0,01	77,45±0,09	73,48±7,88
10	1,68	0	0	8,5	2	30	96,55±0,00	97,01±0,01	44,95±0,11	64,65±0,00
11	0	-1,68	0	6	0,32	30	52,38±0,86	0,00±0,00	3,60±0,78	40,15±0,56
12	0	1,68	0	6	3,68	30	99,02±0,03	98,13±0,04	65,71±0,01	69,66±3,48
13	0	0	-1,68	6	2	9,8	98,26±0,04	97,27±0,08	45,57±0,11	60,63±3,80
14	0	0	1,68	6	2	55,2	98,69±0,04	99,18±0,05	62,59±0,03	73,48±1,13
15	0	0	0	6	2	30	98,04±0,08	97,8±0,03	57,99±0,01	67,61±1,74
16	0	0	0	6	2	30	97,04±0,00	97,58±0,01	51,22±0,03	66,25±1,13
17	0	0	0	6	2	30	97,53±0,04	97,05±0,03	58,41±0,62	65,97±0,60

Nota: (Ens.) ensaios; (turb.) turbidez; (cor ap.) cor aparente; (abs.) absorvância  $\lambda$ -254 nm.

Fonte: Elaborado pelo autor

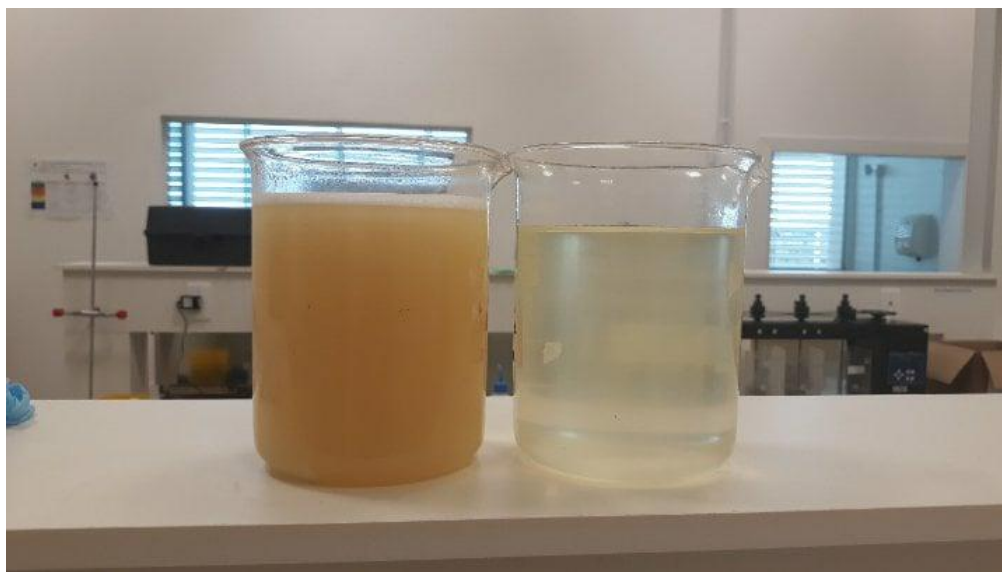
De acordo com os resultados do Quadro 2, analisando simultaneamente todos os ensaios, as maiores porcentagens de remoção ocorreram nos ensaios: 7, tratado nas condições X<sub>1</sub>(4,5), X<sub>2</sub>(3 A), X<sub>3</sub>(45 min), e , obtendo uma remoção das variáveis dependentes de 73,35 % de DQO, acima de 93 % para os parâmetros turbidez e cor e 75 % para a absorvância  $\lambda$ -254 nm; e ensaio 14, tratado nas condições de tempo, pH e corrente de 55,2 min, 6 e 2 A,

respectivamente, obtendo uma remoção de 98,69 % de turbidez, 99,18 % de cor, 62,59 % de absorvância  $\lambda$ - 254 nm e 73,48 % de DQO.

As menores eficiências de remoção foram observadas nos ensaios 1 (53,4 % de remoção de DQO; 70,21 % de turbidez; 34,7 % de cor e 3,18 % absorvância  $\lambda$ - 254 nm e 11 (40,15 % de remoção de DQO; 52,38 % de remoção de turbidez; 3,6 % de remoção de absorvância  $\lambda$ - 254 nm; sem remoção observada para o parâmetro cor. Os ensaios em que as variáveis dependentes não obtiveram remoção ou observa-se mínima remoção coincidem com as condições operacionais em que foi aplicado menor corrente elétrica ou tempo de tratamento.

Na Figura 4 é possível visualizar a diferença entre o efluente bruto e o efluente tratado por EF com eletrodo de Al.

Figura 4 - Efluente bruto e efluente tratado por EF



Fonte: elaborado pelo autor.

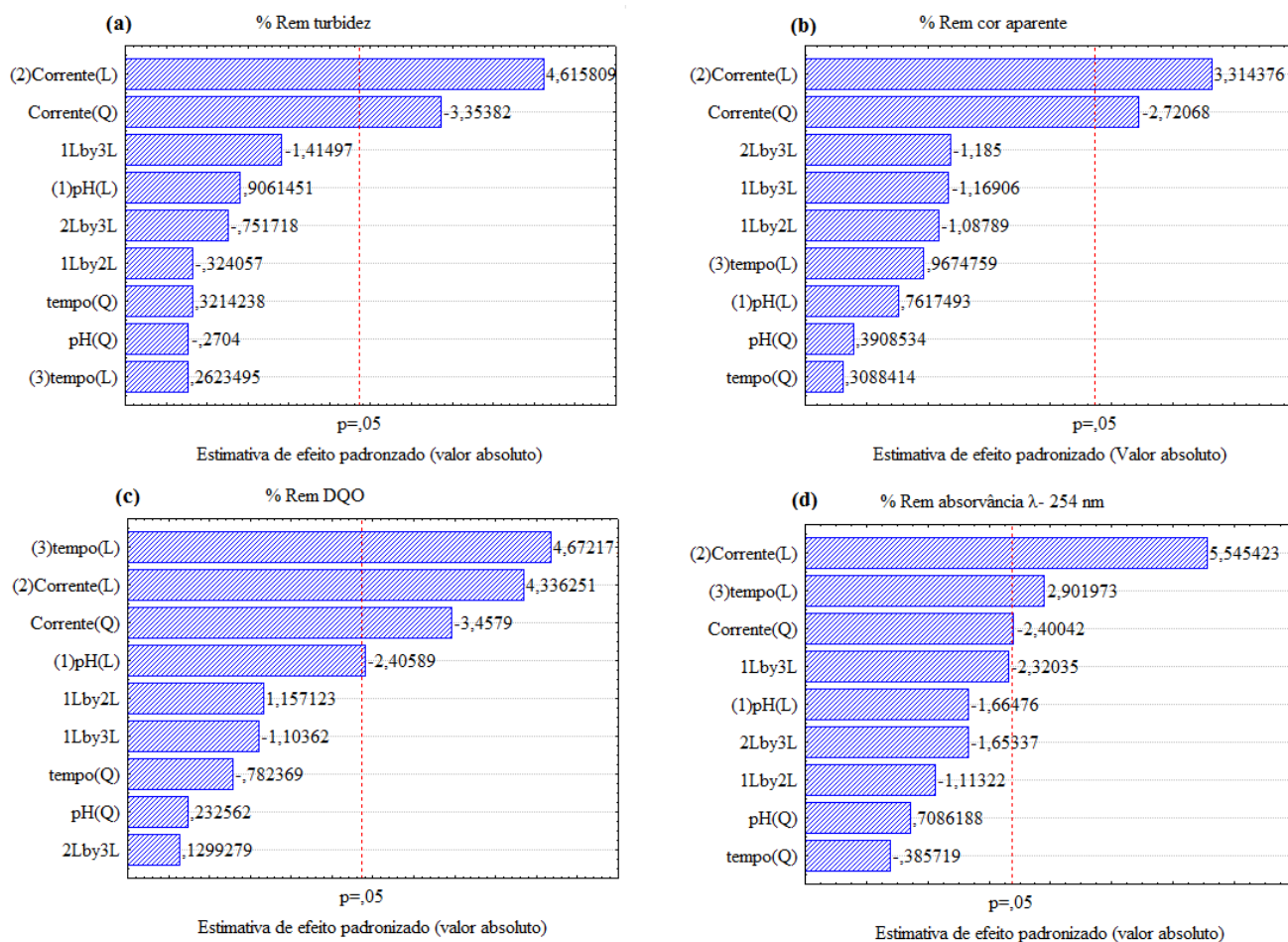
Ressalta-se o uso de ácido clorídrico (HCl) e hidróxido de potássio (KOH) para atingir o pH desejado em cada ensaio e que a adição de cloreto de sódio (NaCl) foi indispensável, uma vez que a condutividade inicial do efluente bruto não foi o suficiente para atingir a corrente máxima proposta no DCCR. Após ensaio com a maior corrente, definiu-se uma dosagem padrão de 3,0 g de NaCl para todos os ensaios.

## 5.2.2 Otimização do processo de EF

Para validar o ajuste proposto pelos resultados obtidos, realizou-se ANOVA, a partir do modelo previsto no delineamento experimental para a remoção dos parâmetros cor, turbidez, DQO e absorvância  $\lambda$ - 254 nm.

A primeira etapa de validação consiste na análise dos efeitos absolutos das variáveis independentes  $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_3$  por meio do gráfico de Pareto, ilustrado na Figura 5. No gráfico de Pareto, pode-se identificar os parâmetros e as interações que influenciam significativamente as variáveis dependentes, com 95 % de confiança, representado pela linha traçada vermelha. As variáveis lineares são representadas por (L) e as quadráticas por (Q), os sinais positivos ao lado das barras apontam um aumento na remoção dos parâmetros e os sinais negativos redução dos parâmetros.

Figura 5 - Gráfico de Pareto para as variáveis dependentes (a) Turbidez, (b) Cor aparente, (c) DQO e (d) Absorvância  $\lambda$ - 254 nm



Nota: (Rem) Remoção. Fonte: elaborado pelo autor.



Conforme a análise simultânea dos gráficos de Pareto apresentados na Figura 5, a corrente elétrica em termos lineares se mostrou eficiente no intervalo de 95% de confiança para a remoção dos quatro parâmetros, e em termos quadráticos para remoção de turbidez, cor e DQO. A variável “tempo de tratamento” foi estatisticamente significativa em termos lineares na remoção de DQO e absorvância  $\lambda$ - 254 nm. O pH, em termos lineares, foi estatisticamente significativo na remoção de DQO.

Os resultados da ANOVA estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - ANOVA do modelo previsto para a redução de DQO, turbidez, cor e absorvância  $\lambda$ - 254 nm de efluente lácteo tratado por EF com eletrodo de Al ao nível de significância de 95% ( $p < 0,05$ )

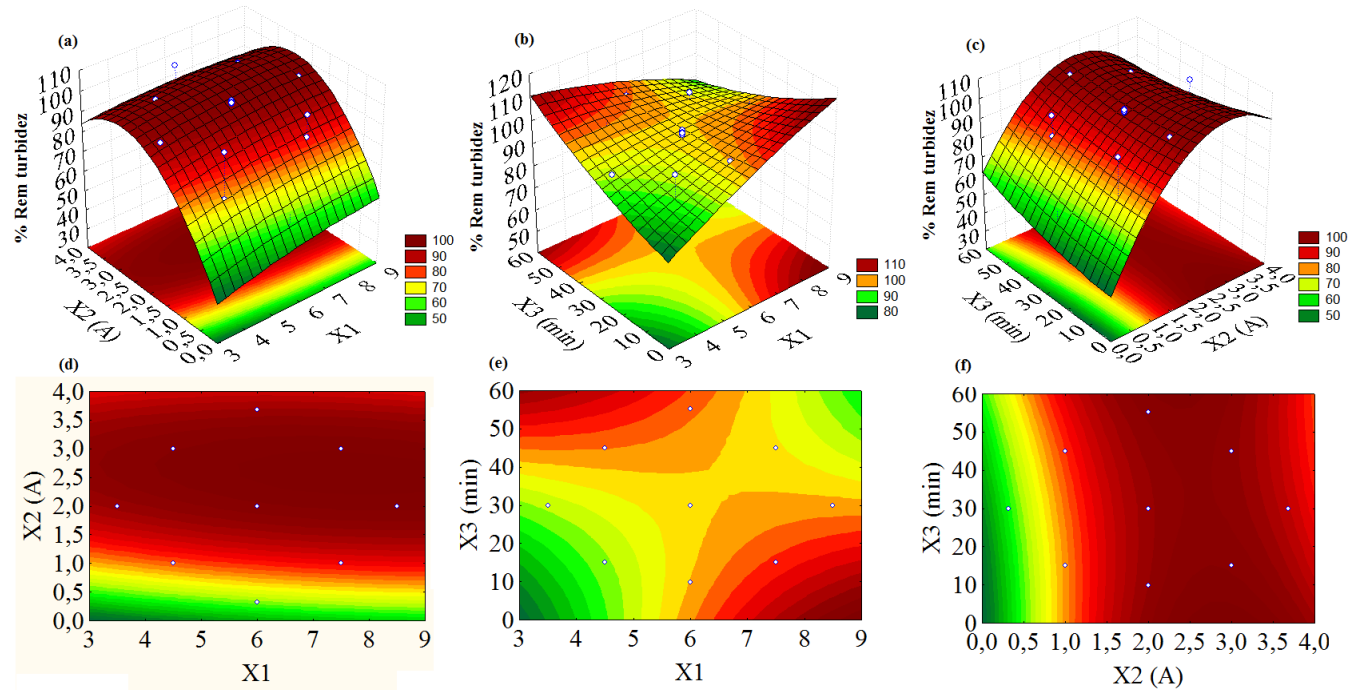
Parâmetro	Modelo quadrático	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Média dos quadrados	Fcal/ Ftab	p-valor
DQO	Regressão	1.486,197	7	212,314	12,756 / 3,293	0,00050743
	Resíduos	149,796	9	16,644		
	Total	1.635,993	16	228,958		
Turbidez	Regressão	2.500,696	7	357,242	8,224 / 3,293	0,00265848
	Resíduos	390,972	9	43,441		
	Total	2.891,668	16	400,683		
Cor	Regressão	12.051,539	7	1721,648	6,082 / 3,293	0,00764864
	Resíduos	2.547,524	9	283,058		
	Total	14.599,063	16	2004,706		
Absorvância $\lambda$ - 254 nm	Regressão	7.036,581	7	1005,226	12,146 / 3,293	0,0006141
	Resíduos	744,87	9	82,763		
	Total	7.781,451	16	1087,989		

Nota: (Fcal) Fcalculado; (Ftab) Ftabelado. Fonte: elaborado pelo autor.

Observa-se (Tabela 8) que o p-valor das variáveis  $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_3$ , mostrou-se estatisticamente satisfatório a 95% de confiança, para as variáveis dependentes. Ressalta-se que o valor do Fcalculado é maior que o Ftabelado, o que também comprova que é significativo. Além disso, a regressão é maior que os resíduos para todas as variáveis, comprovando que o modelo estatístico proposto é válido.

Posteriormente, estão apresentados os gráficos de superfície de resposta e perfil de contorno (Figuras 6, 7, 8 e 9). Cada gráfico expressa o comportamento da porcentagem de remoção de cada variável resposta, em função das variáveis independentes, pH ( $X_1$ ), corrente ( $X_2$ ) e tempo de tratamento ( $X_3$ ).

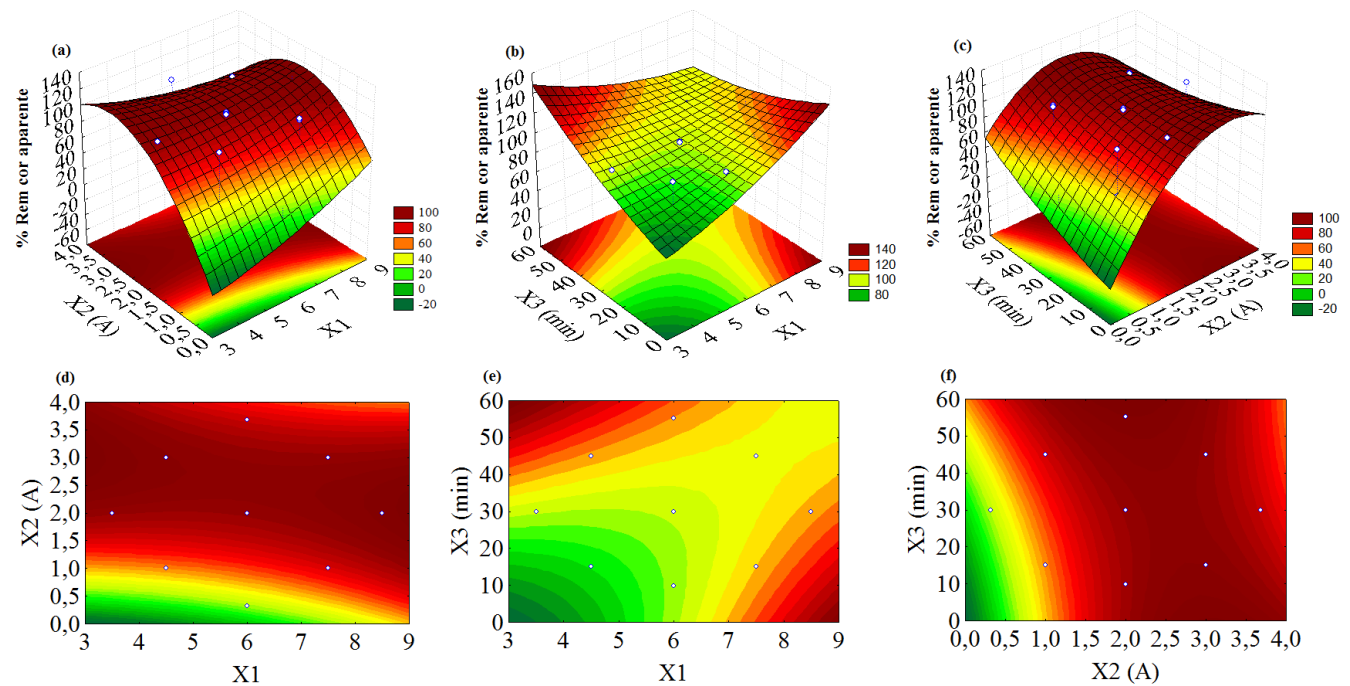
Figura 6 - Remoção da variável Turbidez



**Nota:** (a) superfície de resposta considerando  $X_1$  e  $X_2$ ; (b) superfície de resposta considerando  $X_1$  e  $X_3$ ; (c) superfície de resposta considerando  $X_2$  e  $X_3$ ; (d) perfil de contorno considerando  $X_1$  e  $X_2$ ; (e) perfil de contorno considerando  $X_1$  e  $X_3$ ; (f) perfil de contorno considerando  $X_2$  e  $X_3$ .

Fonte: elaborado pelo autor.

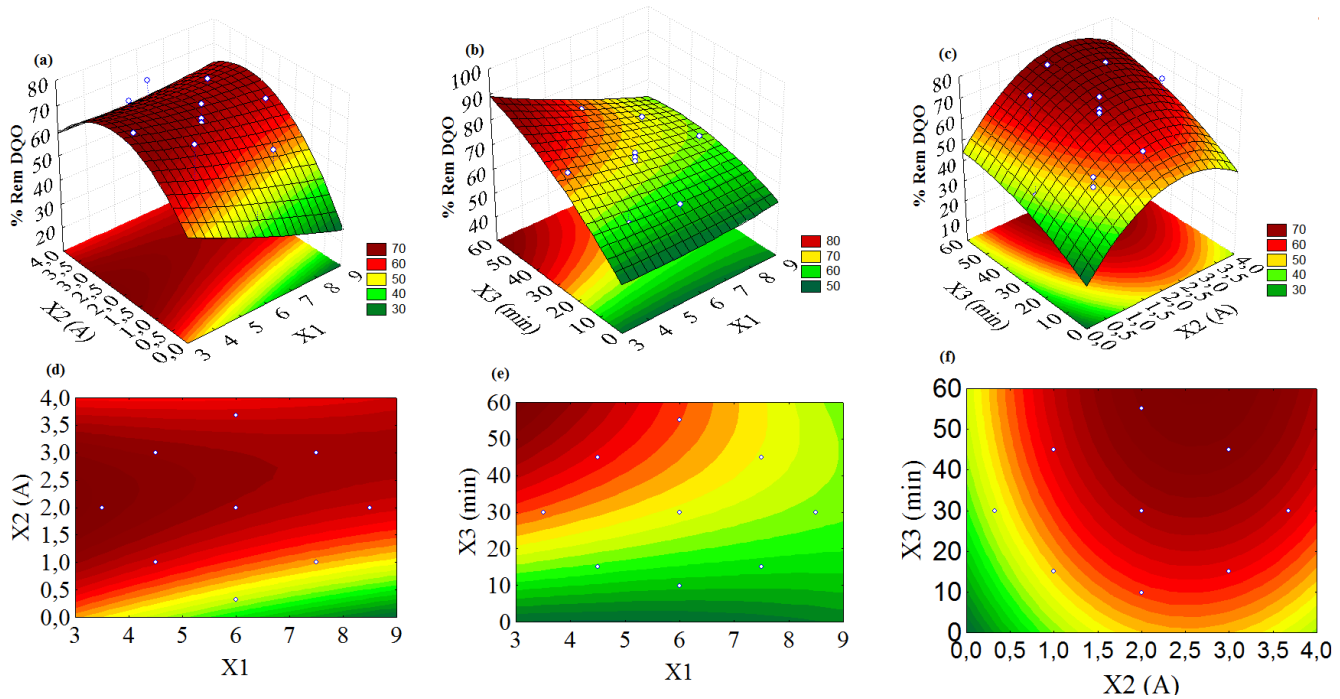
Figura 7 - Remoção da variável Cor aparente



**Nota:** (a) superfície de resposta considerando  $X_1$  e  $X_2$ ; (b) superfície de resposta considerando  $X_1$  e  $X_3$ ; (c) superfície de resposta considerando  $X_2$  e  $X_3$ ; (d) perfil de contorno considerando  $X_1$  e  $X_2$ ; (e) perfil de contorno considerando  $X_1$  e  $X_3$ ; (f) perfil de contorno considerando  $X_2$  e  $X_3$ .

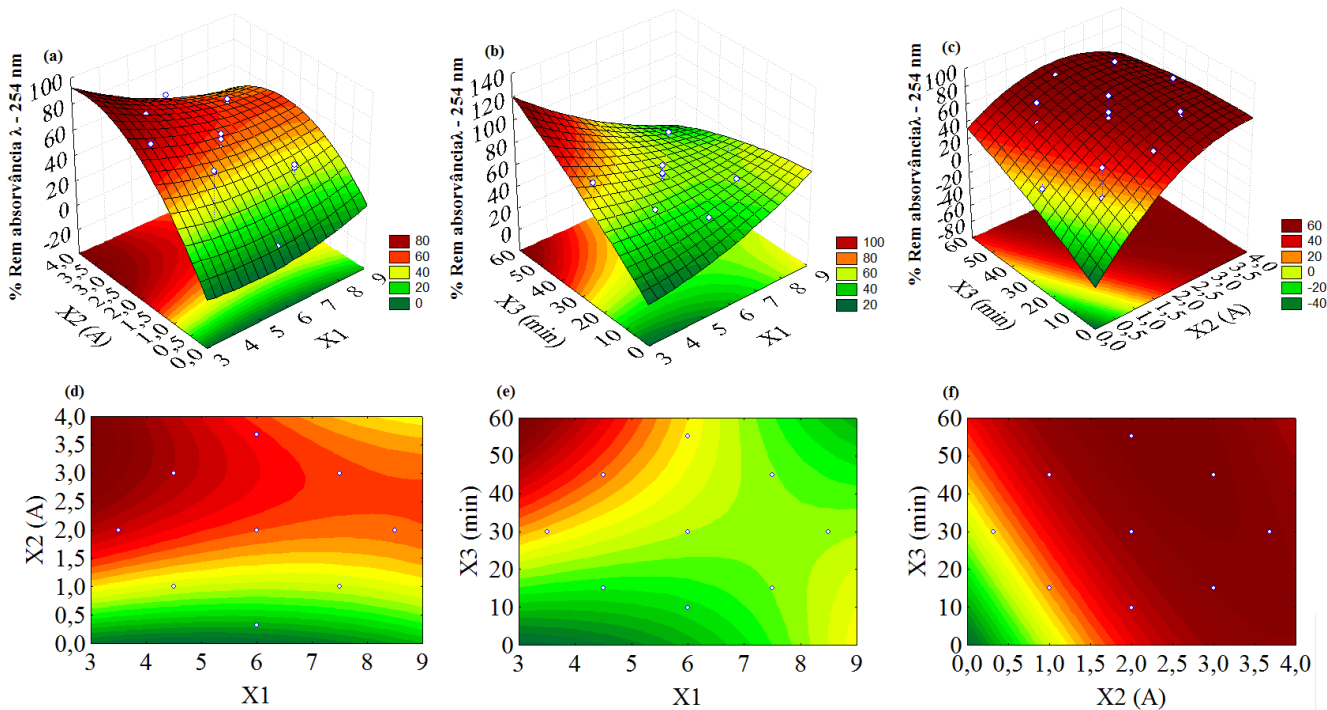
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 8 - Remoção da variável DQO



Nota: (a) superfície de resposta considerando  $X_1$  e  $X_2$ ; (b) superfície de resposta considerando  $X_1$  e  $X_3$ ; (c) superfície de resposta considerando  $X_2$  e  $X_3$ ; (d) perfil de contorno considerando  $X_1$  e  $X_2$ ; (e) perfil de contorno considerando  $X_1$  e  $X_3$ ; (f) perfil de contorno considerando  $X_2$  e  $X_3$ .

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 9 - Remoção da variável Absorvância  $\lambda$ - 254 nm

Nota: (a) superfície de resposta considerando  $X_1$  e  $X_2$ ; (b) superfície de resposta considerando  $X_1$  e  $X_3$ ; (c) superfície de resposta considerando  $X_2$  e  $X_3$ ; (d) perfil de contorno considerando  $X_1$  e  $X_2$ ; (e) perfil de contorno considerando  $X_1$  e  $X_3$ ; (f) perfil de contorno considerando  $X_2$  e  $X_3$ .

Fonte: elaborado pelo autor.

A partir da Figura 6, pode-se observar que quando o pH está associado com uma média corrente aplicada (2,5 – 3 A), não influencia muito na remoção da turbidez. Já quando o pH está associado com o tempo de tratamento, a maior remoção ocorre para valores altos de tempo (55 – 60 min) e valores baixos de pH (3 – 4). Considerando as variáveis de tempo e de corrente aplicada, a maior remoção ocorre para valores altos de tempo (30 – 60 min) e valores médios e altos de corrente (2,5 – 3,5 A).

Observando a Figura 7, foi possível concluir que ocorreu maior remoção de cor aparente para valores de corrente médios e altos (2,5 – 4 A), pH mais baixo (3 – 4) se considerar o tempo de tratamento, pois considerando a corrente aplicada, o pH não influenciou muito na remoção. A remoção também é maior conforme o tempo de tratamento aumenta (30 – 60 min).

Pode-se observar na Figura 8 que as maiores taxas de remoção de DQO ocorrem quando o tempo de tratamento é maior (40 – 60 min), com uma corrente aplicada média a alta (2 – 4 A) e com valores baixos de pH (3 – 4).

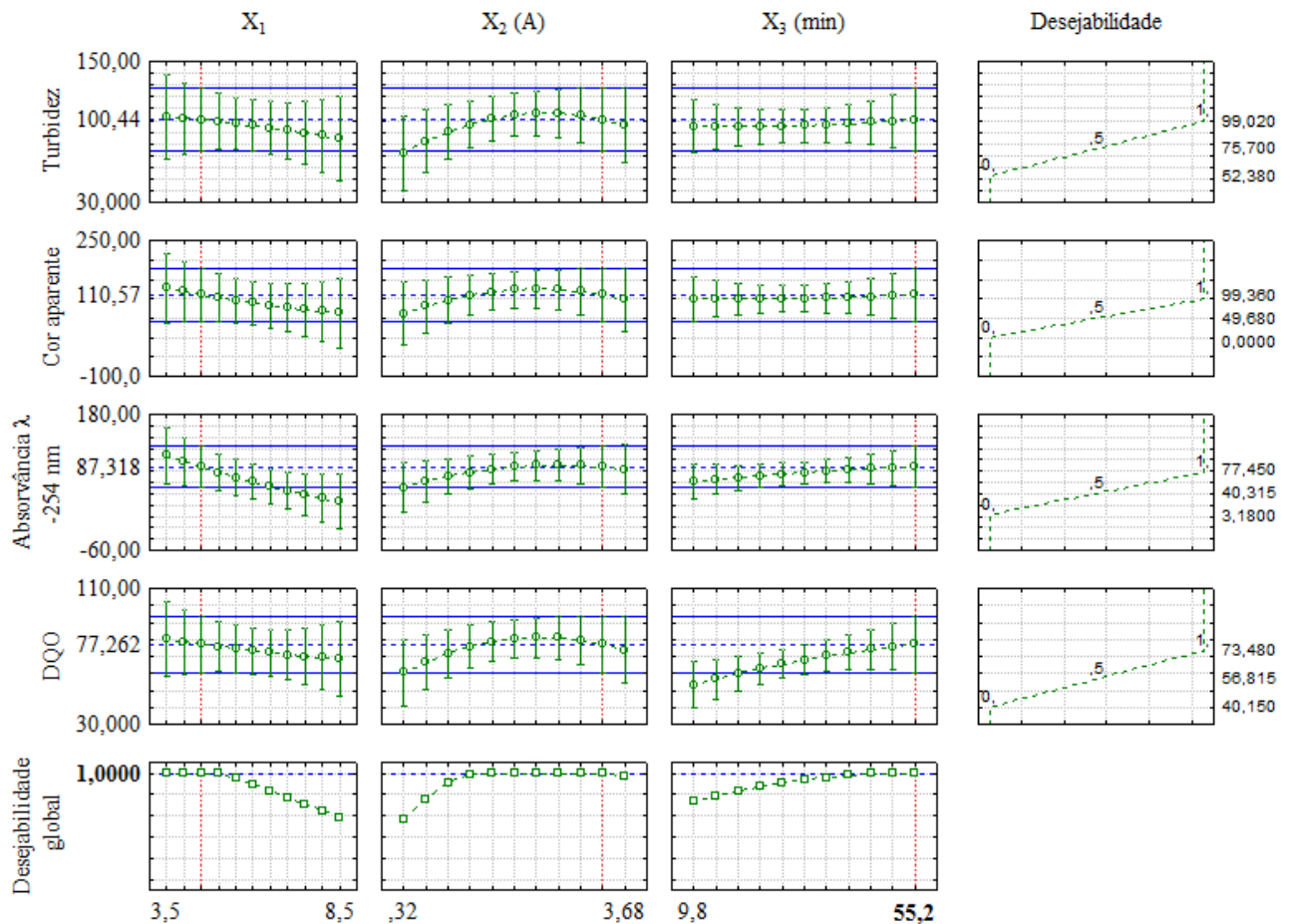
Constatou-se que a maior eficiência na remoção da variável absorvância  $\lambda$ - 254 nm ocorre quando a solução é submetida a uma corrente elétrica média/alta (2,5 – 4 A), um alto tempo de tratamento (50 – 60 min) e valores de pH mais baixos (3 – 4), conforme Figura 9.

### 5.2.3 Desejabilidade Global

Conforme foi observado na análise estatística, todas as variáveis respostas foram significativas ao nível de 95 % de confiança. Desse modo, ao invés de utilizar a equação geral (Equação 5), que forneceria um valor individual otimizado para cada parâmetro, optou-se por utilizar a função *Desirability*, do software *Statistica*® 7, que permite a otimização de múltiplas variáveis respostas, para determinar os valores operacionais otimizados das variáveis independentes visando maior remoção das variáveis dependentes.

Pode-se observar na Figura 10 os valores ótimos de trabalho. O valor de desejabilidade global varia de 0 a 1, quanto mais próximo estiver de 1, mais próxima será a resposta obtida daquela pretendida. A função global obtida foi igual a 1, indicando assim uma excelente resposta.

Figura 10 - Otimização simultânea das variáveis dependentes por meio da função de Desejabilidade Global

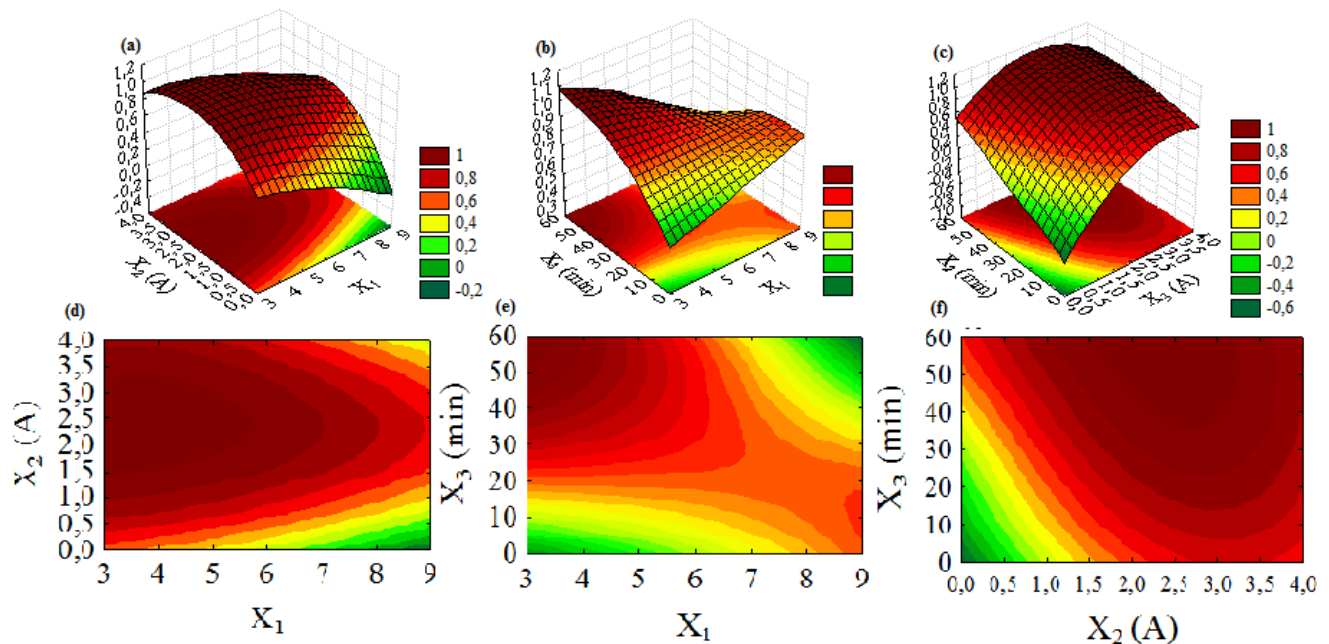


Fonte: elaborado pelo autor.

A linha vermelha nos gráficos indica os valores otimizados das variáveis  $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_3$  que corresponderam a: 4,5, 3,34 A e 55,2 min respectivamente. O intervalo em azul no gráfico (Figura 10) representa a remoção prevista para as variáveis dependentes quando o efluente lácteo for tratado por EF nas condições otimizadas acima supracitadas. A partir dessas condições, espera-se que aconteça uma remoção de 100 % de turbidez, 100 % de cor aparente, 87,3 % de absorvância  $\lambda$ - 254 nm e 77,3 % de DQO.

Na Figura 11 estão representadas as superfícies de resposta e os perfis de contorno nas condições de desejabilidade.

Figura 11 - Remoção das variáveis resposta nas condições de desejabilidade global



Nota: (a) superfície de resposta considerando  $X_1$  e  $X_2$ ; (b) superfície de resposta considerando  $X_1$  e  $X_3$ ; (c) superfície de resposta considerando  $X_2$  e  $X_3$ ; (d) perfil de contorno considerando  $X_1$  e  $X_2$ ; (e) perfil de contorno considerando  $X_1$  e  $X_3$ ; (f) perfil de contorno considerando  $X_2$  e  $X_3$ .

Fonte: elaborado pelo autor.

A partir da Figura 11, é possível concluir que, considerando pH e corrente, a maior remoção das variáveis respostas acontece quando o pH é baixo e a corrente é média. Já quando considera-se o pH e o tempo de tratamento, a maior remoção ocorre quando o tempo é alto e o pH é baixo. E, por fim, considerando o tempo de tratamento e a corrente, a maior remoção é observada quando os valores de tempo são altos e a corrente é média.

#### 5.2.4 Validação do modelo proposto

A partir da análise estatística e da função de desejabilidade global, aplicou-se a EF no efluente lácteo bruto nas condições de  $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_3$  otimizadas a fim de validar os resultados obtidos na Figura 10. Na Tabela 9, é possível a comparar a remoção prevista supracitada com a remoção real.

Tabela 9 - Validação do modelo de desejabilidade global

Parâmetros	Efluente Bruto	Otimizado	% Remoção estimada	% Remoção Real
DQO (mg L <sup>-1</sup> )	7.462,92 ± 86,49	2.019,70 ± 86,00	77,30 ± 0,00	72,95 ± 1,16
Turbidez (UNT)	1.640,00 ± 14,14	69,00 ± 0,00	100,00 ± 0,00	95,80 ± 0,00
Cor aparente (u.C)	14.350,00 ± 353,00	309,00 ± 16,90	100,00 ± 0,00	97,90 ± 0,07
Absorvância λ-254 nm (u.a)	4,52 ± 0,03	1,31 ± 0,00	87,30 ± 0,00	71,50 ± 0,55

Fonte: elaborado pelo autor.

A remoção de DQO real foi de 72,95 % ± 1,16, valor próximo ao estimado (77,3 %). Este valor (2019,70 ± 86,00 mg L<sup>-1</sup>) não está de acordo com o valor estipulado pela Resolução CONSEMA N° 128/2006. Para Melchior et al. (2016), a remoção de DQO foi 97 %, com os parâmetros otimizados de 60 minutos de tratamento, corrente de 5 V e pH 5. O aumento na corrente e no tempo de tratamento podem acarrear um aumento no valor gasto para aplicar a EF.

O parâmetro da turbidez apresentou um valor de 69 UNT, estando de acordo com os padrões de emissão da legislação. A porcentagem de remoção real ficou próxima a estimada. Resultado semelhante foi obtido por Bensadok, Hanafi e Lapique (2011), no tratamento de efluente lácteo com uso de eletrodos de Al e Ti/Pt, utilizando corrente elétrica de 0,5 mAcm<sup>-2</sup>, pH de 6,6 e tempo de tratamento de 2 min, a remoção de turbidez foi de 96 %.

A remoção de cor aparente foi de 97,9 %, valor aproximado do estimado. Embora esse valor ainda esteja acima do padrão estabelecido nas Resoluções N° 357/2005 e N° 430/2011 do CONAMA (75 u.C), a alta remoção pode indicar diminuição na quantidade de sólidos, visto que eles são os principais agentes causadores de cor no efluente. Benazzi (2013), a partir das condições otimizadas de voltagem (7,5 V), tempo (60 min) e distância entre eletrodos (2 cm), obteve uma remoção de cor de 99 %.

A remoção da absorvância λ- 254 nm no efluente lácteo tratado por EF nas condições otimizadas foi de 71,5 %, Almeida et al. (2004) apresenta que, em meio ácido, os compostos orgânicos são mais rapidamente removidos, devido ao ataque seletivo aos compostos aromáticos. Comparando com o valor do bruto, é possível analisar que houve remoção dos compostos orgânicos e, conseqüentemente, a quebra dos compostos aromáticos, que é evidenciada pela diferença de altura da banda de absorção. A discrepância da remoção estimada e da remoção real pode ser devido à calibração do espectrofotômetro ou questões de armazenamento de amostra.

Os parâmetros físico-químicos analisados na caracterização inicial (Tabela 7) do efluente lácteo bruto foram novamente avaliados após a EF com uso de eletrodo de sacrifício de Al, utilizando as condições de tempo de tratamento, pH e corrente elétrica otimizadas. Os resultados estão expostos na Tabela 10.

Tabela 10 - Caracterização do efluente após EF

Parâmetros	Efluente lácteo bruto	Efluente lácteo tratado por EF (otimizado)
Temperatura (C°)	25,00 ± 2,00	27,00 ± 1,41
pH	12,74 ± 0,03	9,09 ± 0,03
Condutividade (uS cm <sup>-1</sup> )	8,90 ± 0,01	11,45 ± 0,06
OD (mg L <sup>-1</sup> )	0,755 ± 0,07	7,00 ± 0,00
Sólidos sedimentáveis (mg L <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )	0,00	0,00
ST (mg L <sup>-1</sup> )	10.685,00 ± 117,00	8.235,00 ± 111,00
STF (mg L <sup>-1</sup> )	3.400,00 ± 98,00	6.350,00 ± 127,00
STV (mg L <sup>-1</sup> )	7.285,00 ± 168,00	1.885,00 ± 104,00
SST (mg L <sup>-1</sup> )	2.000,00 ± 124,00	350,00 ± 141,00
SSF (mg L <sup>-1</sup> )	250,00 ± 20,00	200,00 ± 21,00
SSV (mg L <sup>-1</sup> )	1.750,00 ± 565,00	150,00 ± 70,00
SDT (mg L <sup>-1</sup> )	8.685,00 ± 143,00	7.885,00 ± 189,00
SDF (mg L <sup>-1</sup> )	3.150,00 ± 42,00	6.150,00 ± 84,00
SDV (mg L <sup>-1</sup> )	5.535,00 ± 403,00	1.735,00 ± 233,00
Óleos e graxas (mg L <sup>-1</sup> )	880,00 ± 107,00	76,66 ± 4,71
DBO (mg L <sup>-1</sup> )	430,00 ± 0,00	3,50 ± 0,00

Fonte: elaborado pelo autor.

A temperatura do efluente tratado é  $27 \pm 1,41$  °C, valor bem próximo a temperatura do efluente lácteo bruto. Já o pH passou de  $12,74 \pm 0,02$  para  $9,09 \pm 0,03$ , estando no limite máximo (ph 9) estabelecido nas Resoluções N° 357 e N° 430 do CONAMA e N° 128 da CONSEMA.

A DBO do efluente tratado está de acordo com os valores estipulados nas Resoluções N° 357 do CONAMA e N° 128 do CONSEMA. O valor da DBO reduziu 99,2 %. Bazrafshan et al. (2013) obteve uma remoção de 98 % de DBO aplicando a EF com eletrodos de Al por 60 min e potencial de 60 V.

A condutividade do efluente tratado aumentou de  $8,9 \pm 0,00$  uS cm<sup>-1</sup> do bruto para  $11,44 \pm 0,06$  uS cm<sup>-1</sup>. Esse aumento se deve à adição de NaCl durante o processo de EF.

O teor de óleos e graxas diminuiu significativamente após a EF, visto que o efluente bruto possuía  $880,00 \pm 107$  mg L<sup>-1</sup> e o tratado possui  $76,66 \pm 4,71$  mg L<sup>-1</sup>, ou seja, mais de



90 % de remoção. Pode-se citar que uma das maiores vantagens da EF é a remoção de óleos e graxas, devido à facilidade de coagulação e flotação dessas moléculas (MACHADO et al., 2007). Apesar da alta remoção, esse valor ainda se encontra acima do limite estabelecido na legislação para o teor de óleos e graxas de origem animal ou vegetal, que é, no máximo, 20 mg/L.

O valor do OD após o tratamento por EF aumentou em valor acima de 80 % se comparado ao OD encontrado na caracterização do efluente lácteo bruto. Esse comportamento pode ter relação com a diminuição da matéria orgânica, evidenciados na Tabela 10.

Os sólidos, apesar de apresentarem redução, ainda estão em desacordo com os limites estipulados na legislação, podendo se fazer necessário a aplicação de um pós-tratamento. A remoção dos SST foi maior que 80%. Bazrafshan et al. (2013) aplicou o processo de EF com eletrodos de Al e obteve remoção de 97,75 % de SST com pH inicial de 7,24, tempo de tratamento de 60 min e potencial elétrico de 60 V.

## 6 CONCLUSÃO

A partir da caracterização do efluente bruto de uma indústria de produtos lácteos por meio da análise de parâmetros físico-químicos, verificou-se a existência de parâmetros (pH, DQO, DBO, OD, turbidez, cor aparente, óleos e graxas, sólidos suspensos) em desacordo com as Resoluções Nº 357/2005 e Nº 430/2011 do CONAMA, e a Nº 128/2006 do CONSEMA evidenciando a necessidade de tratamento adequado do efluente para possibilitar o lançamento em corpo hídrico receptor.

Realizou-se um planejamento fatorial completo DCCR ( $2^3$ ) com 3 repetições no ponto central e 6 repetições nos pontos axiais para obter a interação simultânea entre todas as variáveis. A partir destes resultados, a ANOVA assegurou, com 95% de confiabilidade estatística, a influência das variáveis independentes corrente elétrica, tempo de tratamento e pH para a máxima eficiência do tratamento de EF com uso de eletrodo de Al na remoção das variáveis dependentes, DQO, absorvância  $\lambda$ - 254 nm, cor aparente e turbidez.

A análise da função desejabilidade global e da superfície de resposta, possibilitou a determinação dos valores otimizados das variáveis independentes, sendo estes: pH inicial de 4,5, corrente elétrica 3,34 A e tempo de tratamento de 55,2 min. A partir dessas condições otimizadas, obteve-se uma remoção real de 72,95 % para DQO, 95,8 % para turbidez, 97,9 % para cor aparente e 71,5 % para absorvância  $\lambda$ - 254 nm.

Por fim, o uso do DCCR, da ANOVA, da função desejabilidade global e superfície de resposta e contorno, possibilitaram concluir que o tratamento do efluente lácteo por EF mostrou-se eficiente para a remoção das variáveis respostas consideradas neste estudo. Sugere-se uma etapa de pré-tratamento e, se necessário, uma etapa de pós-tratamento para os parâmetros que, mesmo com a alta remoção, ainda estão em desacordo com os limites estipulados nas legislações. Sugere-se para uma pesquisa futura, a realização da análise do residual de Al do efluente.

## REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 14550. **Couro - Banho residual e efluente líquido - Determinação do teor de sólidos dissolvidos, dissolvidos fixos e dissolvidos voláteis**. 2015.
- ALMEIDA, E. et al. Tratamento de efluentes industriais por processos oxidativos na presença de ozônio. **Química Nova**, São Paulo, v. 27, n. 5, p. 818-824, 2004.
- AN, C. et al. Emerging usage of electrocoagulation technology for oil removal from wastewater: A review. **The Science of the Total Environment**, v. 579, p. 537-556, 2017.
- ANDRADE, L. H. **Tratamento de efluente de indústria de laticínios por duas configurações de biorreator com membranas e nanofiltração visando o reuso**. 2011. 231 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente) - Universidade Federal de Minas Gerais, Curso de pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Belo Horizonte, 2011.
- ANDRADE, M. I. R. et al.. Avaliação de metodologias utilizadas na determinação de carbono orgânico em águas bruta e tratada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 22., 2003, Joinville. **Anais...** Joinville, 2003.
- APHA. American Public Health Association. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21<sup>a</sup> Ed. Washington – DC: APHA, 2005.
- AQUINO NETO, S. et al. Treatment of waste dye by electroflocculation: an experiment for undergraduate in chemistry. **Química Nova**, São Paulo, v. 34, n. 8, p. 1468 -1471, 2011.
- AZZOLINI, J. C.; FABRO, L. F. Monitoramento da eficiência do sistema de tratamento de efluentes de um laticínio da região meio-oeste de Santa Catarina. **Unoesc & Ciência - ACET**, Joaçaba, v. 4, n. 1, p. 43-60, 2013.
- BALANNEC B. et al. Treatment of dairy process waters by mbrane operations for water reuse and milk constituents concentration. **Desalination**, v. 147, p. 89-94, 2002.
- BARRETO, M. E. Considerações sobre a legislação ambiental em geral e o sistema nacional de unidades de conservação aplicável a unidades de conservação localizadas no município de Lima Duarte, na Zona da Mata Mineira, a saber: o Parque Estadual do Ibitipoca e a Reserva Biológica do Patrimônio Natural Serra do Ibitipoca. In: **Âmbito Jurídico**, Rio Grande, v. 12, n. 63, 2009. Disponível em: <[http://www.ambito-juridico.com.br/site/index.php?n\\_link=revista\\_artigos\\_leitura&artigo\\_id=5916](http://www.ambito-juridico.com.br/site/index.php?n_link=revista_artigos_leitura&artigo_id=5916)>. Acesso em: out. 2017.
- BASSALA, H. D. et al. Investigation of the efficiency of a designed electrocoagulation reactor: Application for dairy effluent treatment. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 111, p. 122–127, 2017.
- BAZRAFSHAN, E. et al. Application of Electrocoagulation Process for Dairy Wastewater Treatment. **Journal of Chemistry**, v. 13, 8 p., 2013.

BELAN, A. L. D. **Eletrofloculação aplicada ao tratamento de efluentes têxteis: Revisão Bibliográfica**. 2014. 40 f. Monografia (Especialista) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curso de pós-graduação em Gestão Ambiental em Municípios, Medianeira, 2014.

BENAZZI, T. L. **Otimização de um sistema de eletrofloculação em fluxo contínuo para o tratamento de efluentes líquidos das indústrias de laticínios**. 2013. 121 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai, Curso de pós-graduação em Engenharia de Alimentos, Erechim, 2013.

BENSADOK, K.; HANAFI, N. E.; LAPICQUE, F. Electrochemical treatment of dairy effluent using combined Al and Ti/Pt electrodes system. **Desalination**, v. 280, p. 244–251, 2011.

BENVENUTI, J. **Estudo de caso de avaliação da eficiência do tratamento biológico de lodos ativados**. 2013. 37 f. Trabalho de conclusão de curso - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Curso de graduação em Engenharia Química, Porto Alegre, 2013.

BIASSIO, V. C. **Tratamento de efluente na indústria de eucalipto utilizando eletroflotação**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas, 2017.

BILA, D. M. **Apostila Tópicos Especiais I – Laboratório de Engenharia Sanitária**. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <[https://www.cepueerj.uerj.br/App\\_Upload/Apostila\\_LES\\_2007-Parte\\_1.pdf](https://www.cepueerj.uerj.br/App_Upload/Apostila_LES_2007-Parte_1.pdf)>. Acesso em: jan. 2018.

BNDES. **Produção leiteira o Brasil**. BNDES Setorial 37, p. 371-398, 2013. Disponível em: <[https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/1514/1/A%20mar37\\_09\\_Pro du%C3%A7%C3%A3o%20leiteira%20no%20Brasil\\_P.pdf](https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/1514/1/A%20mar37_09_Pro%20du%C3%A7%C3%A3o%20leiteira%20no%20Brasil_P.pdf)>. Acesso em: ago. 2017.

BRAGA, E. A. S. et al. Avaliação da biodegradabilidade das águas de lavagem provenientes da etapa de purificação do biodiesel produzido com óleo extraído das vísceras de tilápia. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 9, n. 2, p. 35-45, 2012.

CANDIOTI, L. V. et al. Experimental design and multiple response optimization. Using the desirability function in analytical methods development. **Talanta**, v. 124, p. 123 –138, 2014.

CARVALHO, D. L.; SOUZA, M. A. C.; ZEMPULSKI, D. A. Utilização do método eletrofloculação para tratamento de efluentes industriais. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, v. 3, n. 14, pp. 14-28, 2015.

CENI, G. et al. Eletrofloculação, empregando eletrodos de ferro, para o tratamento de efluentes líquidos de laticínios. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 11., 2015, Campinas. **Anais...** Campinas: Unicamp, 2015.

CERQUEIRA, A. A. **Aplicação da técnica de eletrofloculação no tratamento de efluentes têxteis**. 2006. 111 f. Dissertação (Mestrado em Química Ambiental) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Curso de pós-graduação em Química, Rio de Janeiro, 2006.

CERQUEIRA, A. A.; MARQUES, M. R. C.; RUSSO, C. Avaliação do processo eletrolítico em corrente alternada no tratamento de água de produção. **Química Nova**, v. 34, n. 1p. 59 – 63, São Paulo, 2011.

CHEN, G. Electrochemical technologies in wastewater treatment. **Separation and Purification Technology**, v. 38, p. 11–41, 2014.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Significado ambiental e sanitário das variáveis de qualidade das águas e dos sedimentos e metodologias analíticas e de amostragem**. 52 p. Governo do Estado de São Paulo, Secretaria do Meio Ambiente, 2009.

COMBATT, M. P. M. **Aplicação da técnica de eletrocoagulação no tratamento de efluentes de abatedouros de aves**. 2009. 70 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Curso de pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Viçosa, 2014.

COMETTI, M. F. et al. Eletrofloculação com diferentes eletrodos de Al. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 20., 2014, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2014.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências**. Resolução nº 357 de 17 de março de 2005.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA**. Resolução nº 430 de 13 de maio de 2011.

CONSELHO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Dispõe sobre a fixação de Padrões de Emissão de Efluentes Líquidos para fontes de emissão que lancem seus efluentes em águas superficiais no Estado do Rio Grande do Sul**. Resolução nº 128 de novembro de 2006.

CRESPILHO, N. F; REZENDE, M. O. **Eletroflotação: Princípios e aplicações**. São Carlos: Editora Rima, 2004.

CRESPILHO F. N.; REZENDE, M. O. O. Tratamento de efluente da indústria de processamento de coco utilizando eletroflotação. **Química Nova**, v.27, n.3, p. 387-392, 2004.

DALLAGO, R. M. et al. Eletrofloculação aplicada ao tratamento de efluente de laticínio. **Perspectiva**, Erechim. v. 36, n.135, p.101-111, 2012.

DEBONA, D. **SC conquista o quarto lugar na produção de leite no Brasil**. Disponível em: <<http://dc.clicrbs.com.br/sc/noticias/de-ponto-a-ponto/noticia/2017/04/sc-conquista-o-quarto-lugar-na-producao-de-leite-do-brasil-9773825.html>>. Acesso em: dez. 2017.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Gado de leite**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/gado-de-leite>>. Acesso em: dez. 2017.

FAO. **Faostat: statistics division, trade, download data, crops and livestock products, 2017**. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#data/QL>>. Acesso em: jan. 2018.

FEAM – Fundação Estadual do Meio ambiente, Governo do Estado de Minas Gerais. **Plano de ação para adequação ambiental das indústrias de recepção e preparação de leite e fabricação de produtos de laticínios no estado de minas gerais**. Belo Horizonte, 2011. Disponível em: <<http://www.feam.br/noticias/1/1284-plano-de-acao-para-adequacao-ambiental-das-industrias-de-recepcao-e-preparacao-de-leite-e-fabricacao-de-produtos-de-laticinios>>. Acesso em: jan. 2018.

FORNARI, M. M. T. **Aplicação da técnica de eletro-floculação no tratamento de efluentes de curtume**. 2007. 112 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de Processos) Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Curso de pós-graduação em Engenharia Química, Toledo, 2007.

GOBBI, L. C. A. **Tratamento de água oleosa por eletrofloculação**. 2013. 121 f. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade Federal do Espírito Santo, Curso de pós-graduação em Energia, São Mateus, 2013.

HAMDANI, A.; MOUNTADAR, M.; ASSOBBHEI, O. Comparative study of the efficacy of three coagulants in treating dairy factory waste water. **International Journal of Dairy Technology**, v. 58, n. 2, p.83 – 88, 2005.

HARTMANN, W. **Sólidos totais em amostras de leite de tanques**. 2002. 70 f. Dissertação (Mestrado em Produção Animal) - Universidade Federal do Paraná, Curso de pós-graduação em Ciências Veterinárias, Curitiba, 2002.

HOLT, P. K. et al. A quantitative comparison between chemical dosing and electrocoagulation. **Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects**, v. 211, p. 233 - 248, 2002.

HOLT, P. K., BARTON, G. W., Mitchell, C. A. The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology. **Chemosphere**, v. 59, p. 355–367, 2005.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 4ª Ed. Rio de Janeiro: ABES, 932 p. 1995.

KELM, C. N. P. et al. Aplicação da eletrofloculação no tratamento de efluentes têxteis de Toritama/PE. **Anais do Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 2, 2014.

KHANDEGAR, V., SAROHA, A. K. Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent – A review. **Journal of Environmental Management**, v.128, p. 949 - 963, 2013.

KHEMILA, B. et al. Removal of a textile dye using photovoltaic electrocoagulation. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 7, p. 27–35, 2018.

KOPLIC, R. **Advanced strategies in food analysis: Ultraviolet and visible spectrometry**. 2013. Disponível em: < [https://web.vscht.cz/~poustkaj/EN%20SFA%20AU%20Kopl%C3%ADk%20UV\\_VIS\\_spectrometry.pdf](https://web.vscht.cz/~poustkaj/EN%20SFA%20AU%20Kopl%C3%ADk%20UV_VIS_spectrometry.pdf) >. Acesso em: jan. 2018.

MACHADO, F. G. et al. Eletrofloculação aplicada ao tratamento de água de produção. In: ENCONTRO DA SBQ, 11., 2007, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: UFF, 2007.

MACULAN, J. L. et al. Aplicação de fotoirradiação solar para tratamento de efluentes de laticínios. **Revista Tecnologia e Ambiente**, v. 22, p. 24 – 33, Criciúma, 2016.

MELCHIORS, M. S. et al. Treatment of wastewater from the dairy industry using electroflocculation and solid whey recovery. **Journal of Environmental Management**, v. 182, p. 574 - 580, 2016.

MIRJI, G.; KALBURGI, P. B. Study of electrocoagulation mechanism on dairy wastewater for COD and turbidity removal. **International Journal of Advance Engineering and Research Development**, v. 1, 6 ed., 2014.

MÓDENES, A. N. et al. Aplicação da técnica de eletrocoagulação no tratamento de efluentes de abatedouro de aves. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 3, p. 571-578, 2017.

MOHAMMAD Y.A. et al. Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. **Journal of hazardous Materials**, v. 114, p. 199- 210, 2004.

MOLLAH, M. Y. A. et al. Electrocoagulation (EC) — science and applications. **Journal of Hazardous Materials**, v. 84, p. 29–41, 2001.

MORO, M. F.; ADAMY, A. P. A. Produção mais limpa como alternativa para o gerenciamento de resíduos em laticínios. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 35., 2015, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: ABEPRO, 2015.

MNP – Movimento Nacional de Produtores. Carta Leite. **Maiores laticínios do Brasil em 2016**. Disponível em: <[http://www.mnp.org.br/?pag=ver\\_noticia&id=460132](http://www.mnp.org.br/?pag=ver_noticia&id=460132)>. Acesso em: nov. 2017.

NASCIMENTO, I. L. et al. Eletrofloculação em efluentes oleosos utilizando eletrodos de alumínio. X Congresso Brasileiro de Engenharia Química Iniciação Científica. **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, dezembro de 2014, v. 1, n. 1, 2014.

NOGUEIRA, F. F.; COSTA, I. A.; PEREIRA, U. A. **Análise de parâmetros físico-químicos da água e do uso e ocupação do solo na sub-bacia do Córrego da Água Branca no município de Nerópolis – Goiás**. 2015. 53 f. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal De Goiás, Curso de graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária, Goiânia, 2015.

ORSSATO, F.; HERMES, E.; BOAS, M. A. V. Eficiência de remoção de óleos e graxas de uma estação de tratamento de esgoto sanitário, Cascavel – Paraná. **Engenharia Ambiental, Espírito Santo do Pinhal**, v. 7, n. 4, p. 249-256, 2010.

PARENTE, A. H.; BARROS E SILVA, E. A. Redução de efluentes líquidos na indústria alimentícia. **Revista Química e Tecnologia**, n. 1, 2002.

PIVELI, R. P. **Curso de qualidade das águas e poluição: aspectos físico-químicos, Aula 5 - características físicas das águas: cor, turbidez, sólidos, temperatura, sabor e odor.**

Universidade de São Paulo, 2013. Disponível em:

<<http://www.leb.esalq.usp.br/disciplinas/Fernando/leb360/Fasciculo%205%20-%20Caracteristicas%20Fisicas%20das%20Aguas.pdf>>. Acesso em: fev. 2018.

POKRYWIECKI, T. S. et al. Evaluation of treatment process of dairy effluent. **Ciências Agrárias Ambientais**, Curitiba, v. 11, p. 155-161, 2013.

RODRIGUES, M. I.; LEMMA, A.R. **Planejamento de experimentos e otimização de processos**. 2. ed. Campinas, São Paulo: Casa do Espírito Amigo Fraternidade Fé e Amor, 2009.

ROGGENBACK, J. **Tratamento dos efluentes líquidos em duas indústrias de laticínios dos campos gerais**. 2016. 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Gestão Ambiental) - Universidade Federal do Paraná, Curso de pós-graduação em Gestão Ambiental, Curitiba, 2016.

SANTANA, S. H. C. et al. Estudo de parâmetros de qualidade de água e análise de imagens do Landsat 5 referente ao oeste da região do Submédio São Francisco. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2011, Curitiba. **Anais...** Curitiba: INPE, 2011.

SANTOLIN, C.; ESPINOZA-QUINODES, F. R.; SOUZA, A. R. C. Tratamento de efluente do fármaco ciprofloxacina em reator de eletrocoagulação utilizando eletrodos de alumínio. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 11., Campinas, 2015. **Anais...** Campinas: Unicamp, 2015.

SARAIVA, C. B. et al. Water consumption and effluent generation in a small dairy industry. **Revista do Instituto de Laticínios Cândido Tostes**, v. 367/368, n. 64, p. 10-18, 2009.

SHARMA, D. Treatment of dairy waste water by electro coagulation using aluminum electrodes and settling, filtration studies. **International Journal of ChemTech Research**, v. 6, n. 1, p. 591-599, 2014.

SILVA, C. M. et al. Pré-tratamento de efluente de laticínio visando a remoção da turbidez. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 7., 2016, Campina Grande. **Anais...** Campina Grande: IBEAS, 2016.

SILVA, K. K. O. S. **Caracterização do efluente líquido no processo de beneficiamento do índigo têxtil**. 2007. 177 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Curso de pós-graduação em Engenharia Mecânica, Natal, 2007.

STRATE, J. **Otimização de um sistema de eletrofloculação em fluxo contínuo para o tratamento de efluentes líquidos das indústrias de laticínios**. 2014. 83 f. Trabalho de



Conclusão de Curso - Centro Universitário Univates, Curso de graduação em Engenharia Ambiental, Lajeado, 2014.

TOCCHI, C. et al. Dairy wastewater polluting load and treatment performances of an industrial three-cascade-reactor plant. **Process Biochemistry**, v. 48, p. 941 – 944, 2013.

TONES, A. R. M. **Estudo da aplicação da técnica de eletrofloculação na remoção da cor em misturas de corantes têxteis**. 2015. 70 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, Medianeira, 2015.

UN, U. T.; OZEL, E. Electrocoagulation of yogurt industry wastewater and the production of ceramic pigments from the sludge. **Separation and Purification Technology**, v. 120, p. 386–391, 2013.

VALE, I. C. G. **Avaliação de alternativas para pré-tratamento de efluentes de indústrias agro-alimentares**. 2009. 104 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente) - Universidade do Porto, Porto, 2009.

VERMA, A. K. Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation employing Fe-Al composite electrode. **Journal of Water Process Engineering**, v. 20, p. 168–172, 2017.

VON SPERLING, M. **Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos - Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias**, vol. 1. Belo Horizonte: DESA-UFMG, 452p. 2005.

ZOCCAL, R. **A força do agro e do leite no Brasil**. Balde Branco, 2017. Disponível em: <<http://www.baldebranco.com.br/forca-agro-e-leite-no-brasil/>>. Acesso em: jan. 2018.

ZOCCAL, R. **Dez países top no leite**. Balde Branco, 2017. Disponível em: <<http://www.baldebranco.com.br/dez-paises-top-no-leite/>>. Acesso em: jan. 2018.